

Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Malto stiklo panaudojimas cementinėse sistemose
Baigiamasis magistro studijų projektas

Vitalijus Katiševskij
Projekto autorius

Lekt. Dr. Evaldas Šerelis
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Malto stiklo panaudojimas cementinėse sistemose

Baigiamasis magistro studijų projektas
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (T000M021)

Vitalijus Katiševskij
Projekto autorius

Lekt. Dr. Evaldas Šerelis
Vadovas

Lekt. Dr. Vytautas Bocullo
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vitalijus Katiševskij

Malto stiklo panaudojimas cementinėse sistemose

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vitalijaus Katiševskij, baigiamasis projektas tema „Malto stiklo panaudojimas cementinėse sistemose“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Katiševskij Vitalijus. Malto stiklo panaudojimas cementinėse sistemose. Magistro studijų baigiamasis projektas vadovas lekt. Evaldas Šerelis; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypties grupė): inžinerija, statybos inžinerija (E05)

Reikšminiai žodžiai: stiklo atliekos, betonas, maltas stiklas, šviesai laidus betonas.

Kaunas, 2020. 46 p.

Santrauka

Stiklas – tai vientisa, kieta, amorfinės struktūros medžiaga savo sudėtyje turinti: silicio dioksido ($\text{SiO}_2 \geq 70\%$), natrio oksido ($\text{Na}_2\text{O} \geq 15\%$), kalcio oksido ($\text{CaO} \geq 5\%$) bei magnio oksido ($\text{MgO} \geq 3\%$). Visame pasaulyje besikaupiančios stiklo atliekos panaudojimas yra aktuali šių dienų problema. Kai stiklas tampa atlieka jis yra išmetamas ir kaupiasi sąvartynuose. Kadangi stiklas yra sunkiai yrantis arba būtų galima teigti jog visai neyranti medžiaga, tai patampa aktuali problema kurią neišvengiamai būtina spręsti. Žinoma stiklas kaip perdirbimo produktas iki šiol yra plačiai naudojamas. Iš perdirbamo stiklo gaminamas stiklo pluoštas, audinys skirtas šiluminei izoliacijai pramonės srityse tokiose kaip: automobilių korpusų detalių, jachtų, valčių, skraidymo technikos, cheminių talpų, sporto reikmenų gamyboje, taip pat stiklo atliekos naudojamos kaip abrazyvai stiklo granulių abrazyvo pagalba apdirbami tokie paviršiai kaip metalo, nerūdijančio plieno, akmens, mūro, medžio, plastmasė ir pan.

Techniniu požiūriu, stiklas gali būti 100% perdirbamas neribotą kiekį kartų, tačiau nepaisant perdirbamo stiklo galimybių šios atliekos kiekiai sąvartynuose vis tiek yra labai dideli. Remiantis aplinkos ministerijos duomenimis stiklo atliekos kiekiai susidarantys Lietuvoje per vienerius metus siekia apie 100 tūkst. tonų.

Taigi šios problemos sprendimas panaudojant stiklą statybos rinkoje, produktų gamyboje yra vienas iš galimų racionalaus šios atliekos panaudojimo būdų. Todėl būtina atlikti kuo daugiau išsamių bandymų siekiant iširti medžiagos panaudojimo galimybes ir tikslingumą statybiniuose produktuose.

Magistro baigiamajame projekte susideda iš literatūros analizės bei jos išvadų, tyrimo medžiagų kur aprašytos visos bandymuose naudotos medžiagos: portlandcementis, mikroužpildai, cheminiai priedai, bei maltas stiklas taip pat aprašomi tyrimų metodai: malto stiklo paruošimas kurį apima visas procesas nuo atliekos surinkimo iki žaliavos tinkamos naudoti cementinėse sistemose, savitojo paviršiaus ir dalelių pagal dydį pasiskirstymo bandymas kuriame nustatomas savitasis dalelių paviršius, cemento tešlos paruošimas kur aprašomos darbe naudotos mišinių sudėtys, cemento hidratacijos tyrimas kuriame nustatytas cemento mišinio kietėjimo ir rišimosi laikas, betono mišinio paruošimo bandymas kuriame aprašoma mišinio paruošimo eiga, susitraukimo deformacijų tyrimas kuriuo užfiksuotas darbe tiriamų betono bandinių susitraukimas, bandinių formavimas bei kietinimas laikant bandinius šutinimo kameroje arba vandenyje, lenkiamojo bei gniuždomojo stiprių bandymai kur nustatyti betono stipriai lenkiant ir gniuždant, betono atsparumo šalčiui tyrimas.

Katiševskij Vitalijus. Utilization of Glass Powder in Cement Systems. Master's Final Degree Project supervisor lekt. Evaldas Šerelis; Civil Engineering and Architecture faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering (E05)

Keywords: glass waste, concrete, fineness, light-transmitting.

Kaunas, 2020. 46 p.

Summary

Glass is a solid, solid, amorphous material containing: silica ($\text{SiO}_2 \geq 70\%$), sodium oxide ($\text{Na}_2\text{O} \geq 15\%$), calcium oxide ($\text{CaO} \geq 5\%$) and magnesium oxide ($\text{MgO} \geq 3\%$). Glass waste recycling around the world is a one of major issue today. When the glass becomes waste it is discarded and thus accumulates in landfills. Because glass is difficult to disintegrate or could be said that glass waste is non- disintegrable, it becomes an urgent problem that must be solved. Of course, glass is widely used as a recycling product. Glass fiber made from recyclable glass, a fabric for thermal insulation in industrial applications such as car body parts, yachts, boats, flying equipment, chemical tanks, sporting goods, and glass waste as abrasives for glass bead abrasive surfaces such as metal , stainless steel, stone, masonry, wood, plastic and so on.

Technically, glass can be 100% recyclable an unlimited number of times, but despite the potential of recyclable glass, this amount of waste is still very high in landfills. According to ministry of the environment, the amount of glass waste generated in Lithuania in one year reaches about 100 thousand tons.

Thus, solving this problem by using glass in the construction industry and in product manufacturing is one of the possible ways of rational use of this waste. Therefore, as many detailed tests as possible are needed to investigate the applicability and expediency of the material in construction products.

The Master's thesis investigates the properties of ground glass particles and concrete containing this waste.

Master's thesis consists of literature analysis and its conclusions, research materials describing all materials used in the tests: portland cement, microfillers, chemical additives, and ground glass as well as research methods: preparation of ground glass which covers the whole process from collection to raw material in cementitious systems, test of specific surface and particle size distribution, which determines specific surface of particles, preparation of cement paste where the composition of mixtures used in the work is described, hydration test of cement which determines curing and setting time of cement mixture, deformation study recording the shrinkage of concrete specimens under investigation, formation and hardening of specimens by holding specimens in a shot chamber or water, bending and compressive strength tests where the concrete has been subjected to high fracture and compressive strength tests, and the frost resistance of concrete.

Turinys

| | |
|---|-----------|
| 1. Įvadas | 7 |
| 2. Literatūros analizė | 8 |
| 1.1. Bendrosios žinios | 8 |
| 1.2. Stiklo perdirbimo technologinis procesas | 8 |
| 1.3. Stiklo atliekos antrinis panaudojimas | 9 |
| 1.4. Amorfinė medžiaga (stiklas, šlakas, pelenai) | 11 |
| 1.5. Stiklų cheminė sudėtis | 12 |
| 1.6. Betono su stiklo atliekomis atsparumas šalčiui | 14 |
| 1.7. Cemento hidratacijos procesas, pucolaninė reakcija | 16 |
| 1.8. Riškis jo sudėtis kokie jie būna. | 17 |
| 1.9. Mišiniai su cementiniu ir becemenčiu riškliu | 17 |
| 1.10. Stiklo malimas, dalelių dydžio įtaka betono mišiniam. | 18 |
| 1.11. Šviesai laidus betonas. | 21 |
| 1.12. Literatūros analizės išvados. | 22 |
| 3. Tyrimų medžiagos | 24 |
| 4. Tyrimų metodai | 27 |
| 3.1. Savitasis paviršius ir dalelių pagal dydį pasiskirstymas | 27 |
| 3.2. Cemento tešlos paruošimas..... | 27 |
| 3.2. Cemento hidratacijos tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetrijos bandymu..... | 27 |
| 3.3. Betono mišinio paruošimas..... | 27 |
| 3.4. Betono susitraukimo deformacijų matavimas..... | 28 |
| 3.5. Betoninių bandinių formavimas ir kietinimas | 29 |
| 3.6. Lenkimo ir gniuždymo stipris..... | 29 |
| 3.7. Betono atsparumo šalčiui tyrimas vienpusiu šaldymu..... | 29 |
| 5. Tyrimų rezultatai | 30 |
| 4.1. Malto stiklo paruošimas..... | 30 |
| 4.2. Stiklo savitojo paviršiaus matavimo rezultatai | 30 |
| 4.3. Stiklo granuliometrinės sudėties matavimo rezultatai | 31 |
| 4.4. Rišklio hidratacijos tyrimo pusiau adiabatiniu kalorimetrijos bandymu rezultatai | 32 |
| 4.5. Betono susitraukimo deformacijų matavimo rezultatai | 33 |
| 4.6. Lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio rezultatai | 35 |
| 4.7. Betono atsparumo šalčiui tyrimas vienpusiu šaldymu..... | 39 |
| 4.8. Šviesai laidaus betono bandinio gamybos rezultatai | 42 |
| 6. Išvados | 44 |

Įvadas

Temos aktualumas. Jau kurį laiką Europos Sąjungoje atliekų tvarkymo politika siekiama sumažinti atliekų poveikį aplinkai ir sveikatai bei užtikrinti, kad Europos Sąjungos šalyse išteklių būtų naudojami efektyviau. Ilgalaikis šios politikos tikslas – sumažinti susidarančių atliekų kiekį, o tais atvejais, kai jų išvengti neįmanoma, skatinti naudoti atliekas kaip išteklius, daugiau jų skirti antriniam perdirbimui.

Siekiant įgyvendinti šią politiką imamasi įvairių priemonių, stengiamasi informuoti visuomenę apie tausojančią vartojimą ir tinkamą buitinių atliekų rūšiavimą, finansinė paramos teikimas mažaatliekių, inovatyvių ir efektyvių technologijų, leidžiančių taupiau naudoti gamtos išteklius ir vengti atliekų susidarymo, projektams diegti, atliekų prevencijos ir paruošimo naudoti pakartotinai projektų finansavimas, ir dar daugelis kitų. Iki 2025 m. yra siūloma uždrausti į sąvartynus išmesti perdirbamas medžiagas tokias kaip: stiklas, popierius, metalas ir plastikas bei biologiškai suyrančias medžiagas, ir siūloma siekti, kad iki 2030 m. perdirbamos atliekos visiškai nebūtų išmetamos. Pasiūlymai apima ir pamažu vykdomą atskirų perdirbimo tikslų tam tikroms pakavimo medžiagoms didinimą: iki 2025 m. pasiekti 90 % rezultatą popieriui, iki 2030 m. 60 % – plastikui, 80 % medienai ir 90 % juodiesiems metalams, aliuminiui ir stiklui.

Kadangi stiklo atliekos yra medžiagos, kurių irimo periodas yra labai ilgas, atliekoms perdirbti ateityje yra keliami vis didesni tikslai ir reikalavimai. Taigi visame pasaulyje besikaupiančių stiklo atliekų panaudojimas yra visiems aktuali problema, ir šios problemos sprendimas panaudojant stiklą statybos rinkoje, produktų gamyboje yra vienas iš galimų racionalaus šių atliekų panaudojimo būdų.

Kaip mums žinoma stiklo atlieka šiuo metu yra perdirbama visame pasaulyje tačiau dabartinis atliekos perdirbimas nėra pakankamas. Siekiant pritaikyti stiklo atlieką cementinėse sistemose, statybų rinkoje būtina atlikti kuo daugiau tyrimų apibrėžiančių stiklo atliekos kaip antrinės žaliavos panaudojimo galimybes.

Problematika – kaip tikslingai panaudoti stiklo atliekas, kad statybinis produktas įgautų teigiamų savybių ir atliekos taptų potencialia žaliava statybos rinkoje.

Tikslas – ištirti malto stiklo atliekų įtaką gaminio mechaninėms, cheminėms bei fizikinėms savybėms, nustatyti šių atliekų panaudojimo galimybes cementinėse sistemose.

Uždaviniai:

1. Sukurti malto stiklo atliekų perdirbimo technologiją.
2. Ištirti malto stiklo atliekų įtaką betono mechaninėms ir fizikinėms savybėms.
3. Ištirti malto stiklo įtaką cemento hidratacijos procesui.
4. Ištirti malto stiklo atliekos įtaką betono atsparumui ardomajam šalčio poveikiui.

1. Literatūros analizė

1.1. Bendrosios žinios

Kasmet visame pasaulyje susidaro milijonai tonų stiklo atliekų. Kai stiklas tampa atlieka, jis yra išmetamas į sąvartynus, kuriuose be perstojo kaupiasi, nes yra sunkiai yrantis arba galima būtų sakyti visai neyranti medžiaga. Didžiąją dalį stiklo sudaro silicio dioksidas (silicio ir deguonies junginys – SiO_2).

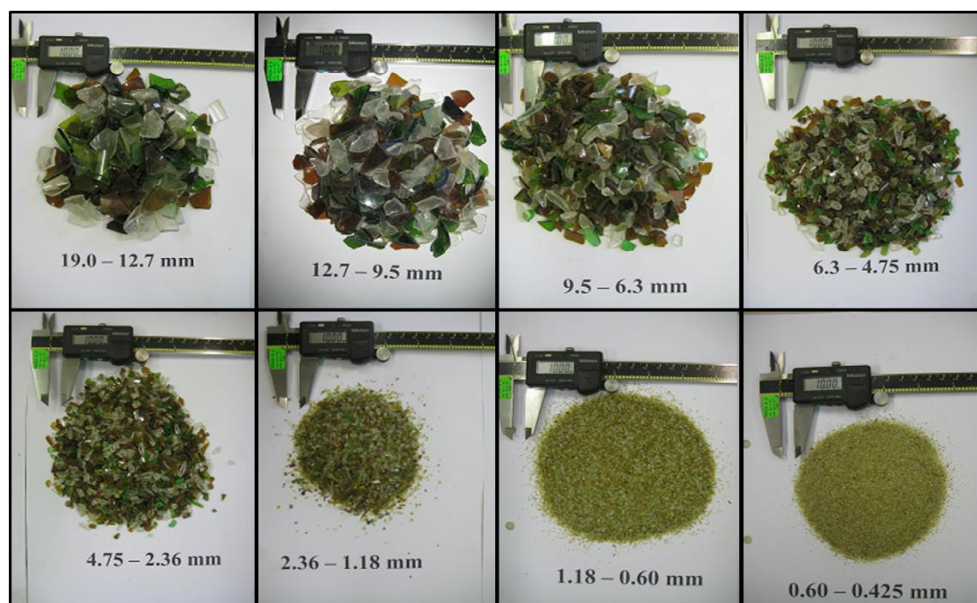
1.2. Stiklo perdirbimo technologinis procesas

Stiklo perdirbimas tai procesas kurio metu stiklo atliekos yra perdirbamos į medžiagą tinkamą antrinei gamybai. Esant poreikiui stiklo atliekos gal būti atskiriamos pagal cheminę sudėtį, tada priklausomai nuo panaudojimo ir perdirbimo galimybių suskirstomos dar ir pagal spalvas. Dėl plataus šios medžiagos panaudojimo stiklas sudaro didelę tiek buitinių tiek pramoninių atliekų dalį. Taip pat žinoma, kad stiklo perdirbimas sunaudoja mažiau energijos lyginant su jo gamyba.

Technologiniai stiklo perdirbimo proceso etapai:

1. Rūšiavimas. Stiklo atliekos turi būti metamos į atitinkamą konteinerį skirtą stiklui, taip pat mums žinoma praktika kai stiklo buteliai yra pridudami į taromatus kur yra atgaunamas depozitas. Prieš perdirbimą pagal poreikį stiklas gali būti rūšiuojamas ir pagal spalvą.
2. Smulkinimas, malimas. Po rūšiavimo etapo stiklas yra smulkinamas, malamas iki norimo dydžio priklausomai nuo jo panaudojimo paskirties.

Remiantis literatūra įprastai stiklas smulkinamas iki tokių standartinių dydžių (1.1 pav.)



1.1 pav. Standartiniai smulkinto, malto stiklo dalelių dydžiai [8]

3. Apdorojimas, valymas. Šiame etape yra atskiriamos nepageidaujamos atliekos. Stiklo duženos patenka į magnetinį lauką, kur iš stiklo pašalinami metaliniai teršalai (dangteliai ir t.t.). Kiti nepageidaujami teršalai tokie kaip popierius, plastikas yra pašalinami automatizuoto proceso metu arba darbuotojų pagalba, rankomis. Proceso eigoje iš malto stiklo taip pat pašalinamos keraminės liekanos, kurių deja pašalinti 100 % ne visada pavyksta ir tai turi neigiamos įtakos perdirbto stiklo kokybei.
4. Lydymas. Po stiklo atliekos apdorojimo aukštoje temperatūroje vyksta lydymo procesas.
5. Spalvos pašalinimas (oksidacija), dažymas.
6. Pakartotinė stiklo gamyba. Stiklas yra perdirbamas į atitinkamus stiklo gaminius (buteliai, indai ir t.t.) Tuo atveju kai smulkintas, maltas stiklas yra naudojamas kito produkto gamybai 3-iasis technologinį procesą aprašantis punktas yra paskutinis.

1.3. Stiklo atliekos antrinis panaudojimas

Antriniam panaudojimui yra pakankamai daug alternatyvų, bene labiausiai žinomos yra šios:

- alternatyvūs stiklo gaminiai (perlydant stiklą). Viena iš alternatyvų yra maži stiklo rutuliukai (angl. Ballotini) (1.2 pav.), kurių diametras siekia 1 – 60 μm . Šie rutuliukai gaminami iš dažniausiai bespalvio stiklo ir yra plačiai naudojami kelių ženkluose skiriamosiose kelio juostose, kadangi puikiai atspindi šviesą, žvilga [7].



1.2. pav. Maži stiklo rutuliukai (angl. Ballotini) [27]

Taip pat mineralinės vatos gamyboje (termoizoliacija). Stiklo pluošto gamybai iš kurio taip pat gaminama begalė produktų;

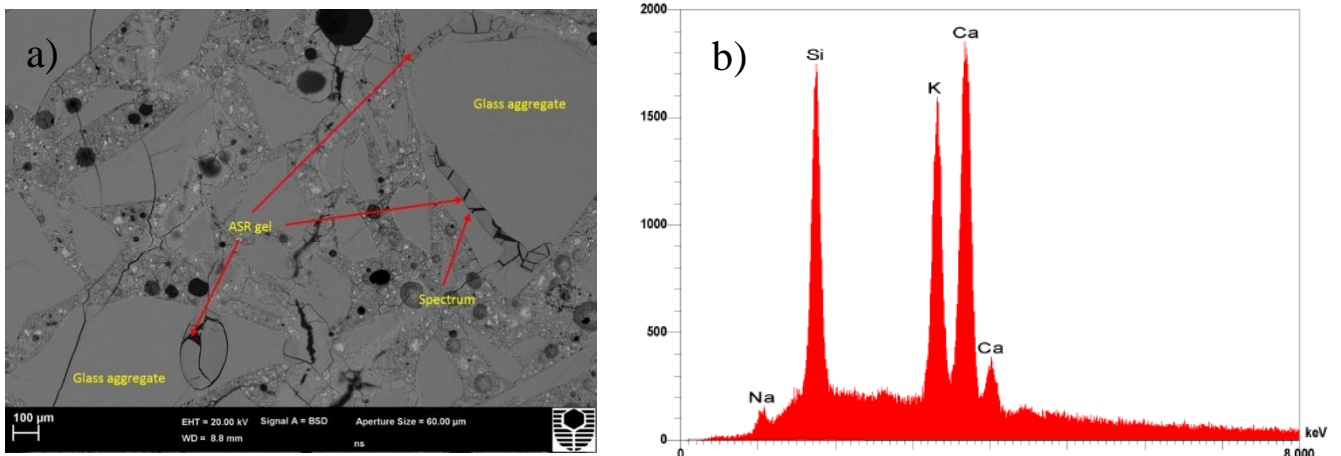
- keramika. Keramikiniuose gaminiuose stiklas atlieka 2 funkcijas, pirmoji yra ta jog stiklas lydosi žemesnėje temperatūroje ir taip apjungia kietas daleles mažindamas poringumą, ir antroji yra ta jog kietos dalelės išsilydžiusios į skystą stiklą sukepa žemesnėje temperatūroje (lyginant su pagrindinėmis žaliavomis) ir taip sumažina gamybos energines sąnaudas [7][8].

- abrazyvai. Stiklas didžiąja dalimi sudarytas iš silicio dioksido (SiO_2) remiantis Moso skale ši medžiaga užima 7 iš 10 vietą (kvarcas) (1.1 lentelė). O tai reiškia jog ši medžiaga pakankamai kieta ir perspektyvi šioje panaudojimo srityje;

1.1 lentelė. Santykinė Moso skalė

| Kietumas | Mineralas | Absoliutinis kietumas |
|----------|---|-----------------------|
| 1 | Talkas ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) | 1 |
| 2 | Gipsas ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) | 3 |
| 3 | Kalcitas (CaCO_3) | 9 |
| 4 | Fluoritas (CaF_2) | 21 |
| 5 | Apatitas ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$) | 48 |
| 6 | Ortoklazas (KAlSi_3O_8) | 72 |
| 7 | Kvarcas (SiO_2) | 100 |
| 8 | Topazas ($\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2$) | 200 |
| 9 | Korundas (Al_2O_3) | 400 |
| 10 | Deimantas (C) | 1500 |

- užpildai. Stiklo stiprumas, standumas ir kietumas yra savybės įrodančios stiklo tinkamumą naudojant jį užpilduose (nesurištuose). Naudojami pėsčiųjų takų, krantinių, pylimų sutvirtinimui [7].
- užpildai bituminiuose mišiniuose. Perdirbto stiklo užpildų panaudojimas bituminių medžiagų mišiniuose greitkelių statyboje tampa vis labiau pripažįstama praktika. Stiklo naudojimo bituminiuose keliuose privalumai yra tie jog kelias tampa atsparesnis slydimui (padidėja trintis, sukibimas tarp padangų ir važiuojamojo paviršiaus) ir padidėja šviesos atsispindėjimas kelio paviršiuje, kas suteikia kelio ruožui didesnę matomumą [7][8].
- užpildas betono gamyboje. Stiklas taip pat kaip užpildas gali būti ir yra naudojamas betono mišiniuose. Tačiau šis atliekos panaudojimas iššaukia šarminę betono koroziją (angl. ASR alkali - silica reaction) Šarminė betono korozija - tai reakcija tarp amorfinę struktūrą turinčio silicio dioksido (SiO_2) užpildų (opoka, titnagas) bei cemento hidratacijos metu susidariusių šarmų, kurios pagrindinis produktas nestabilios struktūros natrio/kalio silikato gelis (1.3 pav.).



1.3. pav. Portlandcemenčio mikrostruktūra: a) SEM nuotrauka, susidaręs Kalio silikato gelis dėl panaudoto stiklo duženų ir b) EDX spektre dominuoja Si-K-Ca elementai, kurie būdingi kalio silikato geliui reaguojant su $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [28]

Geriausia priemonė išvengti ASR yra betono priedai, kurie gali kontroliuoti šį procesą. Autorių teigimu, betono šarminė korozija visgi yra viena aktualiausių ir pavojingiausių betono cheminės korozijos rūšių, kuri lėtai, bet nesugražinamai pažeidžia betonines konstrukcijas. Šis procesas gali sukelti ne tik atskirų betoninių konstrukcijų paviršiaus pleišėjimą bet ir išskilinėjimą bei betono suirimą [36][7].

1.4. Amorfinė medžiaga (stiklas, šlakas, pelenai)

Kietosios medžiagos gali būti amorfinės ir kristalinės būsenos. Amorfinėse medžiagose struktūrinės dalelės išsidėsčiusios chaotiškai įvairiomis kryptimis, todėl esant dideliame jų skaičiui, amorfinių medžiagų savybės, nustatytos įvairiomis kryptimis, gaunamos vienodų reikšmių, t.y. jos yra izotropinės [20].

Žinoma jog betono mišiniuose kaip priedai naudojamos šios amorfinės medžiagos:

- stiklas (nereglamentuotas, retai naudojamas). Tai vientisa amorfinė kietą medžiaga kurios didžiąją dalį sudaro silicio dioksidas (SiO_2). Stiklas yra chemiškai itin inertiškas – atsparus korozijai, vandens bei kitam aplinkos poveikiui ir daugeliui cheminių poveikių, o kalbant apie mechanines savybes yra trapus. Kadangi grynas silicio dioksidas verda labai aukštoje temperatūroje (apie 2000 °C) stiklo gamybos proceso metu į smėlį yra įmaišoma sodos (Na_2CO_3), kurios pagalba iki 1000 °C yra mažinama mišinio virimo temperatūra. Sodos įmaišymas taip pat padaro mišinį tirpų vandenyje ir to pasekoje įmaišomas kalcio oksidas (CaO) kuris atstato mišinio netirpumą;
- šlakas. Šlako cemento naudojimas kaip dalinis cemento pakeitimas yra gerai žinomas siekiant sumažinti betono išsiplėtimą dėl šarmo ir silicio dioksido reakcijos. Tai yra plieno ir geležies šalutinis gamybos produktas, garuose ar vandenyje ataušinus iš jo gaminamas stikliškas granuliuotas produktas, kuris vėliau džiovinamas ir malamas į smulkius miltus. Plačiausiai naudojamas yra ketaus gamybos metu susidarę granuliuoti šlakai, kurių sudėtyje yra [22]:

- apie 45% kalcio oksido (CaO);
- 40% silicio dioksido (SiO₂);
- 8% aliuminio oksido (Al₂O₃);
- 6% magnio oksido (MgO);
- Ir nedideli kiekiai apie 1% kitų oksidų.

Šlako cheminė sudėtis artima portlandcemenčiui, tad jis naudojamas kaip priedas (iki 20%) rišiklio masės. Toks mišinys pasižymi atsparumu gėlam vandeniui, todėl tinkamas hidrotechninei statybai ir masyvioms konstrukcijoms kadangi yra egzotermiškas [22].

Pagerėjęs betono, kuriame yra šlako cementas, atsparumas lyginant su betonu be šlako cemento, yra susijęs su sumažėjusiu šarmų pralaidumu, tirpumu ir sunaudojimu bei sumažėjusiu kalcio hidroksido kiekiu;

- Pelenai (Biokuro šalutinis produktas). Tai mineralinės liekanos visiškai sudegus kurui tokiam kaip mediena durpės ar šiaudai deginant jas krosnyse. Pelenų kiekis ir kokybė priklauso nuo žaliavos cheminės sudėties ir degimo temperatūros. Kuo aukštesnėje temperatūroje kuras deginamas tuo geriau susilydo mineralinės kuro liekanos ir susidaro daugiau amorfinio silicio dioksido (SiO₂). Pelenų panaudojimas betono mišiniuose paremtas tuo, kad pelenams būnant sausiems juose išlieka nehidratavęs kalcio oksidas (CaO – degtos kalkės), kuris kietėjant cementui gali dalyvauti pucolaninėse reakcijose ir sudaryti naujų stiprių hidrosilikatų, Šis pelenų panaudojimas taip pat potencialus priedas pakeičiant dalį cemento [22].

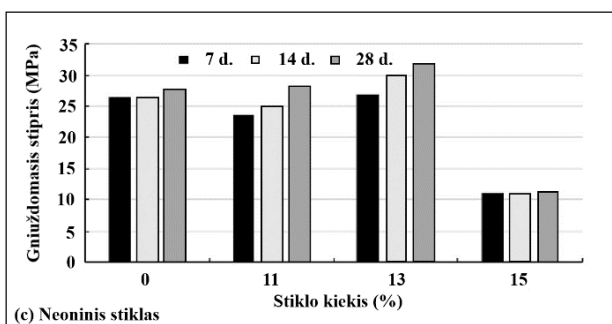
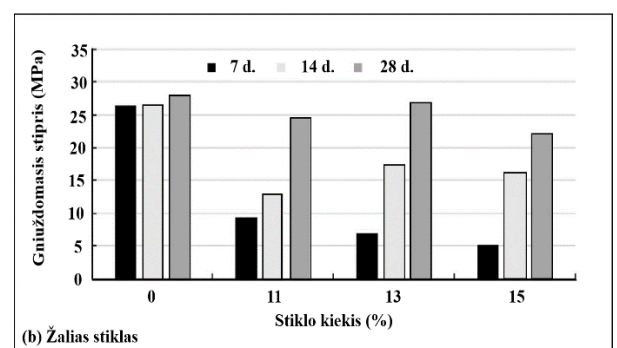
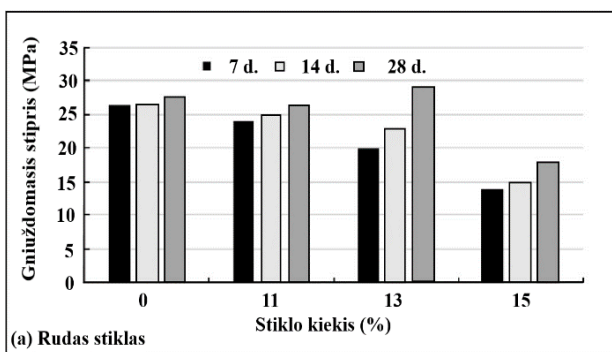
1.5. Stiklų cheminė sudėtis

Nors daug dėmesio yra skiriama stiklo dalelėms, norint nustatyti gaires, kaip tinkamai jas naudoti cemento pagrindu pagamintose medžiagose, reiktų nepamiršti, jog įvairūs stiklo tipai turi skirtingas chemines sudėtis, kaip, tarkime, stiklų sudėtis pagal spalvą taip pat skiriasi (1.2 lentelė), taigi su rišikliu gali įvykti įvairių cheminių reakcijų. Todėl, remiantis stiklo ir rišiklio rūšimi, būtina apibrėžti šių dedamųjų panaudojimo režius [5].

1.2 lentelė. Stiklų, pagal spalvą, cheminė sudėtis [5]

| | Cementas (%) | Skaidrus stiklas (%) | Rudas stiklas (%) | Žalias stiklas (%) |
|--------------------------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| SiO ₂ | 20,20 | 72,42 | 72,21 | 72,38 |
| Al ₂ O ₃ | 4,70 | 1,44 | 1,37 | 1,49 |
| CaO | 61,90 | 11,5 | 11,57 | 11,26 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,00 | 0,07 | 0,26 | 0,29 |
| MgO | 2,60 | 0,32 | 0,46 | 0,54 |
| Na ₂ O ₃ | 0,19 | 13,64 | 13,75 | 13,52 |
| K ₂ O | 0,82 | 0,35 | 0,20 | 0,27 |
| SO ₃ | 3,90 | 0,21 | 0,10 | 0,07 |
| TiO ₂ | - | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| šalutiniai degimo produktai | 1,90 | - | - | - |

Viename iš atliktų tyrimų Malaizijoje buvo tiriama atskirų stiklų įtaka betono mišiniams. Eksperimentas buvo orientuotas į tokių betonų mechanines ir ilgaamžiškumo savybes sutelkiant dėmesį į ilgalaikius stebėjimus (1.4 pav.) [5].

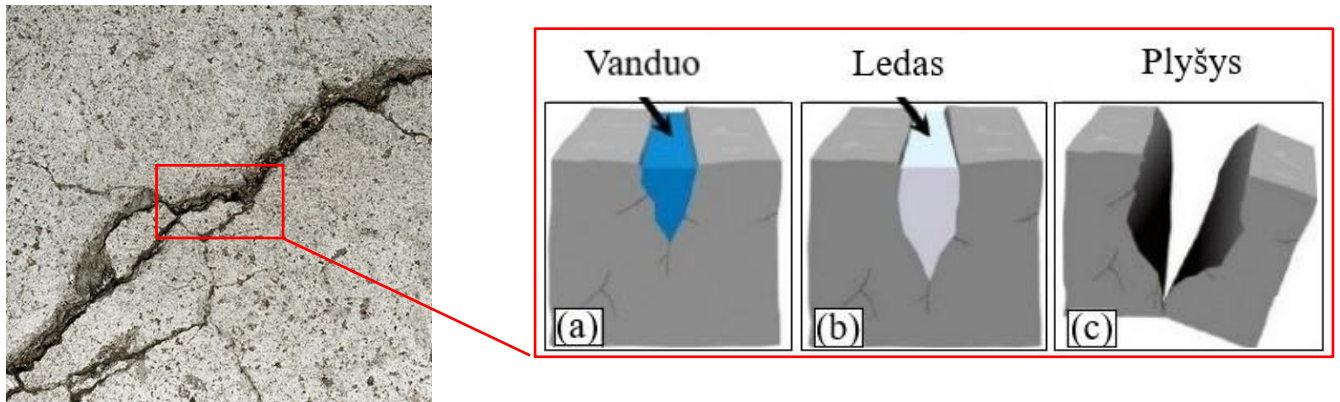


1.4 pav. Gniuždomas stipris. (a) rudasis stiklas, (b) žaliasis stiklas, (c) neoninis stiklas [5]

Apžvelgiant gautus rezultatus matoma, kad panaudojant rudos spalvos stiklą geriausias gniuždomojo stiprio rezultatas buvo pasiektas po 28 parų kietėjimo, 13 % cemento kiekio pakeičiant ruduoju stiklu (1.4 pav. a). O štai žalasis stiklas kaip tik neparodė pranašesnių rezultatų už bandinį kuriame kaip rišiklis buvo panaudotas tik cementas, be jokio pridėtinio žalios spalvos stiklo, kitaip tariant, į rišiklį įterpus žaliojo stiklo, rezultatai tik blogėjo, nepaisant, kiek truko bandinių kietėjimas (1.4 pav. b). Štai bandiniai su neoniniu stiklu po 28 parų kietėjimo buvo pranašesni pakeičiant cementą tiek 11 %, tiek 13 % cemento masės, lyginant su įprastu bandiniu be stiklo priemaišų (1.4 pav. c).

1.6. Betono su stiklo atliekomis atsparumas šalčiui

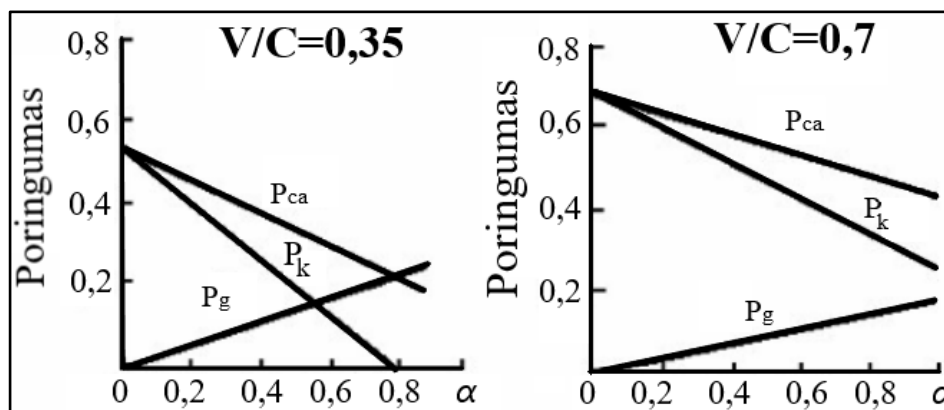
Yra žinoma jog betono atsparumas šalčiui tai viena iš keleto savybių, kuri yra būtina siekiant eksploatuoti betoninius gaminius lauko sąlygomis. Atsparumas šalčiui yra ypač aktualus atšiauriame klimate kur būdingas temperatūrų svyravimas (cikliškumas) bei krituliai, būtent toks klimatas vyrauja ir Lietuvoje.



1.5 pav. Šalčio ardomasis poveikis. (a) vanduo, (b) ledas, (c) plyšys.

Betono struktūroje esančios poros prisipildo vandeniu (1.5 pav. a) ir temperatūrai pasiekus neigiamą reikšmę vanduo šąla į ledą (1.5 pav. b) taip didindamas savo tūrį 9 % ir sukeldamas ardomąjį poveikį betono struktūrai (1.5 pav. c).

Kalbant apie betone susidarancias poras pagal formą, bei kilmę galima išskirti pagrindines porų grupes, tai oro poros, kapiliarinės poros, bei gelio poros. Didelę įtaką visų prieš tai paminėtų porų tipui turi vandens ir cemento santykis (1.6 pav.).



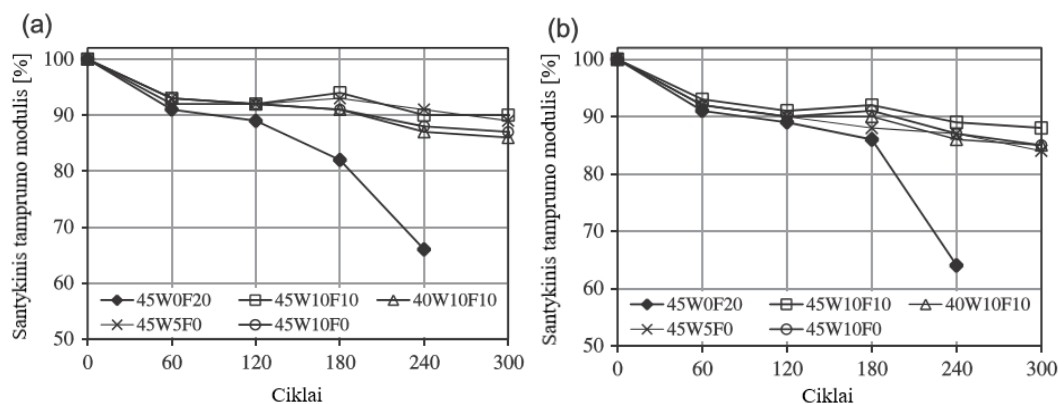
1.6 pav. Cemento akmens bendrojo (P_{ca}), kapiliarinio (P_k) ir gelio (P_g) poringumų priklausomybė nuo hidratacijos laipsnio α [14]

Kapiliarinės poros atsiranda išgaravus vandens pertekliui iš betono mišinio, šios poros yra atviros, tad į jas lengvai patenka vanduo. Kapiliarinių porų kiekis sukietėjusiam cemento akmenyje priklauso nuo V/C santykio [9].

Gelio poros neturi įtakos cemento akmens šalčio atsparumui, nes jos yra labai mažos. Uždaros oro poros susidaro įtraukiant orą iš aplinkos ir kietėjančio cemento akmens susitraukimo metu. Tačiau oro poros, suformuotos iš oro, priešingai, nei kapiliarinės poros, didina gaminio atsparumą šalčiui [9].

Viename Pietų Korėjos universitete buvo atliktas betono ilgalaikiškumo tyrimas panaudojant stiklo atlieką kaip dalinį cemento pakaitalą. Atsparumo šalčiui bandymo metu bandiniai buvo nardinami į gėlą vandenį bei į vandenį su druska (siekiant sudaryti panašias žiemos metu barstomų takų sąlygas), temperatūros cikliškumas nuo + 4 iki -18 °C ir atvirkščiai [10].

Rezultatai parodė jog abejomis sąlygomis tiek gėlame vandenyje, tiek vandenyje su druska mišinys su stiklo atliekomis parodė geresnius rezultatus negu įprastas (1.7 pav.).



1.7 pav. Atsparumo šalčiui bandiniai: (a) vanduo (b) 4% NaCl + CaCl₂ (7:3) [10]

1.7. Cemento hidratacijos procesas, pucolaninė reakcija

Portlandcemenčio hidratacija yra sudėtingas, tačiau suprantamas reiškinys. Visgi pernelyg dažnai ignoruojamos 8 % tūrio susitraukimo pasekmės. Kai cemento pasta negauna jokio išorinio vandens, galinčio užpildyti betono akytumą, atsiranda plyšių ir susidaro tempimo įtempiai, sukeliantys savaiminį susitraukimą, nepaisant to, koks yra vandens ir cemento santykis. Tačiau jei yra išorinis ar vidinis vandens šaltinis, kuris užpildo poringumą, kurį sukuria cheminis susitraukimas, plyšiai ir tempimo įtempiai nesusidaro, taigi betonas neturi jokio savaiminio susitraukimo [2][3][12].

Portlandcemenčio hidratacijai įtakos turi klinkerio mineralinė sudėtis, į mineralus įsiterpę jonai, kurie veikia sistemos kristališkumą, dalelių granulimetrinė sudėtis, vandens ir cemento santykis (V/C), aplinkos temperatūra, priedai, skirti klinkerio malimui gerinti ir cemento tešlos savybėms koreguoti bei priedai, skirti daliai klinkerio pakeisti [12][15].

Svarbiausi produktai, susidarantys cemento hidratacijos metu ir esantys hidratavusio cementinio akmens sudėtyje, yra [14]:

- kalcio hidrosilikatai (C-S-H);
- kalcio hidroksidas (CH);
- etringitas (trisulfatė (AF_t) arba viensulfatė (AF_m) forma).

Pucolanai – tai silikatinės, aliumosilikatinės ar aliuminatinės medžiagos, pasižyminčios silpnomis arba visai neturinčios cementuojančių savybių, tačiau aplinkos temperatūroje, esant drėgmei, chemiškai reaguoja su kalcio hidroksidu, sudarydamos junginius, kurie pasižymi cementuojančiomis savybėmis. Pucolanai iš esmės yra cementuojančios medžiagos, kurios prisideda prie betono savybių arba pucolaninės reakcijos (pvz., lakieji pelenai, silicio mikrodulkės), arba hidraulinės reakcijos (pvz., Maltas granuliuotas aukštakrosnių šlakas). Šios medžiagos paprastai naudojamos iš dalies pakeisti portlandcemenčio komponentą, o pakeitimo dydis labai skiriasi nuo mažiau nei 10 % iki daugiau kaip 50 %, atsižvelgiant į papildomai cementuojančios medžiagos pobūdį [14][15].

Lėta cheminė reakcija tarp pucolaninio priedo ir kalcio hidroksido taip pat yra vadinama pucolanine reakcija. Pucolaninė reakcija iš esmės nekeičia cemento klinkerio mineralų hidratacijos, ji tiesiog papildo ir sujungia hidratacijos procesus. Pucolaninė reakcija baigiasi sumažėjus portlandito ir didėjant kalcio hidrosilikatų kiekiui sistemoje [14][15].

Pucolanų vaidmuo dažniausiai apibūdinamas šiais mechanizmais [15]:

- pucolanai sumažina vandens pralaidumą, tokiu būdu užkerta kelią vandens patekimui ir šarminių metalų bei hidroksido jonų pernešimui;
- pucolanai padidina stiprumą, todėl cemento akmuo yra atsparesnis pleišėjimui ir mažiau plečiasi kietėdamas;
- pakeičiant dalį cemento pucolanine medžiaga, turinčia mažiau šarminių metalų jonų, mažėja bendras šarmų kiekis sistemoje;

- pucolanams reaguojant su $\text{Ca}(\text{OH})_2$ susidaro kalcio hidrosilikatai su mažesniu CaO/SiO_2 santykiu.

1.8. Rišiklis jo sudėtis kokie jie būna.

Mineralinės rišamosios medžiagos tai miltelių pavidalo medžiagos sumaišytos su vandeniu, sudarančios plastišką tešlą, kuri vykstant fizikiniams ir cheminiams procesams, kietėja ir virsta kietuoju kūnu (akmeniu) [10][14].

Mineralinės rišamosios medžiagos pagal kietėjimo pobūdį skirstomos į:

1. Orines. Tai tokios rišamosios medžiagos, kurios kietėja ir išlaiko stiprumą tik ore, bet vandenyje suminkštėja ir nekietėja. Oriniai rišikliai daugiau skirti sausoje aplinkoje eksploatuojamiems gaminiams. Tokio tipo rišikliams priskiriamos: gipsinės rišamosios medžiagos, magnezinės rišamosios medžiagos, orinės kalkės, skystas stiklas, rūgštims atsparus cementas [14].
2. Hidraulines. Šios rišamosios medžiagos kietėja ir išlaiko stiprumą tiek ore tiek vandenyje. Šioms rišamosioms medžiagoms priskiriamas portlandcementis ir jo atmainos, šlakinis ir pucolaninis cementai, plėtrusis cementas, bei hidraulinės kalkės [14].
3. Autoklavines. Kietėja tik autoklavinėmis sąlygomis. Šiems rišikliams priskiriami kalkių-kvarco, kalkių – šlako, kalkių – pelenų rišikliai, kalkių – nefelino bei malto smėlio ir portlandcemenčio rišiklis [14].

Organiniai rišikliai – tai gamtinės arba dirbtinės medžiagos, kurų sudėtyje yra vandenilio atomų, gali kietėti vykstant tik tam tikriems fizikiniams – cheminiams procesams [12][14].

Polimeriniai rišikliai – stambiamolekulinės medžiagos kurių tarpusavio dalelės susietos kovalentiniais ryšiais. Polimerai gali būti gamtiniai ir sintetiniai.

1.9. Mišiniai su cementiniu ir becemenčiu rišikliu

Rišiklis – tai medžiaga, mišinio visumos dalis apjungianti kietas daleles į vientisą masę. Didžioji dalis rišiklių geba sustingti kartu fiziškai ar chemiškai apjungdami mišinio komponentus ar kitas medžiagas.

Rišamąsias medžiagas tikslinga skirstyti į 2 grupes : mineralines ir organines rišamąsias medžiagas.

Mineralinės rišamosios medžiagos – tai smulkiai sumalti milteliai, juos sumaišius su vandeniu susidaro tešla, kuri per tam tikrą laiką sukietėja ir virsta dirbtiniu akmeniu. Mineralinės rišamosios medžiagos dar skirstomos į orinės ir hidraulinės. Visos jos išgaunamos išdegant uolienas arba specialiai paruoštus uolienu mišinius ir smulkiai sumalus. Orinės rišamosios medžiagos sumaišytos su vandeniu ar kitu skiedikliu, kietėja ore. (pvz., gipsas, magnezitas, kalkės) [22].

Hidraulinės rišamosios medžiagos sumaišytos su vandeniu ar kitu skiedikliu, gali kietėti drėgnoje aplinkoje ir vandenyje (pvz., portlandcementis, mišrieji cementai, aluminatinis cementas, hidraulinės kalkės ir pan.) [19][22].

Organinės rišamosios medžiagos būna gamtinės ir dirbtinės. Jas galima skirti į tris grupes: bitumai (gamtiniai ir naftiniai), dervos (akmens anglies skalūnų, medienos, durpių) ir polimerai (vieni galintys polimerizuotis, o kiti polikondensuotis). Organinės rišamosios medžiagos dažnai naudojamos kelių dangoms tokioms kaip asfaltbetonis, polimerbetonis ir kitoms statybinėms konstrukcijoms bei gaminiams gaminti [21][22].

Kalbant apie cemento neturinčius, ekologiškus rišiklius šiuo metu smarkiai populiarėja „žaliojo“ betono (angl. Green concrete) tyrimai. Žinoma, kad cemento gamyba yra vienas iš dagiausiai energijos suvartojančių technologinių procesų kurio metu į atmosferą išmetamas didelis CO₂ kiekis, kuris yra vienas pagrindinių šiltnamio efektą kuriančių veiksnių, tad ši problema aktuali visame pasaulyje, ir aplinkos, išteklių išsaugojimas yra didelis iššūkis.

„Žaliajam“ betonui naudojamos atliekos gali būti sugrupuotos į tris kategorijas: žemės ūkio, pramonines ir komunalines atliekas (1.8 pav.)



1.8 pav. Atliekų grupės naudojamos „žaliojo“ betono gamyboje [23]

„Žalioju“ betonu pagamintos konstrukcijos yra ekologiškai tvarios, be to atliktuose tyrimuose matoma tendencija jog betonas su šiais priedais kai kuriais atvejais po ilgesnio laikotarpio įgauna net geresnes stiprumines savybes, tokias kaip gniuždomasis, lenkiamasis stipris ir pan. lyginant su įprastu betonu kuriame naudojamas įprastas portlandcementis (OPS angl. Ordinary portlandcement) [6][23][24].

1.10. Stiklo malimas, dalelių dydžio įtaka betono mišiniam.

Stiklas kaip amorfinė medžiaga turi palyginti didelius kiekius silicio ir kalcio, teoriškai yra puolaninė arba net cementinė medžiaga kai kalbama apie smulkiai sumaltą stiklą. Būtent dėl šios priežasties maltas stiklas yra tinkamas cemento pakaitalas [16].

Tačiau naudojant malto stiklo atlieką betono mišiniuose išauga potenciali šarminės korozijos grėsmė (ASR angl. alkali – silica reaction). Ši reiškinį sukelia nepageidaujamos cheminės reakcijos tarp sukietėjusio betono (Na₂O ir K₂O) šarmų ir agregatuose esančių reaktyviųjų silicio arba karbonato komponentų. Betone tarp silicio, esančio agregate, ir šarminių ir hidroksido jonų, esančių gelio porose geliui sugeriant vandenį užsipildžiusios poros gali didinti tūrį medžiagos viduje ir taip įvyksta ardomas poveikis galintis sukelti potencialios grėsmės konstrukcijų stipruminėms savybėms. Todėl labai svarbu rasti būdų, kaip jį sumažinti ir gaminti šarminėi korozijai atsparų betoną [10][15][17].

Viename iš atliktų bandymų susijusių su stiklo smulkumo įtaka betono savybėms buvo tiriama TFT-LCD (Plonasluoksnių tranzistorių skystųjų kristalų ekranas angl. Thin-film-transistor liquid-crystal display) stiklo panaudojimo galimybės atliekant bandymus su dviejų smulkumo tipų stiklo atliek t.y. 88 μm ir 150 μm dalelių dydžio maltu stiklu (1.3 lentelė) [16].

1.3 lentelė. Skirtingo dydžio TFT-LCD stiklo atliekos skiedinio proporcijos (nuo 3 iki 10%) [16]

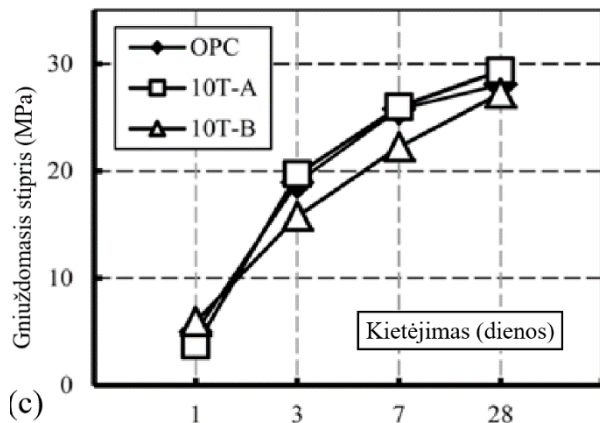
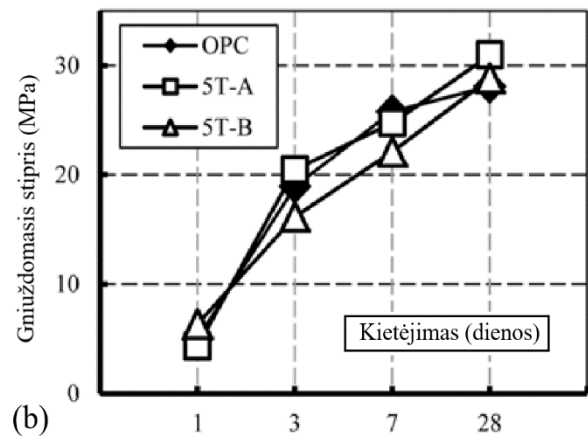
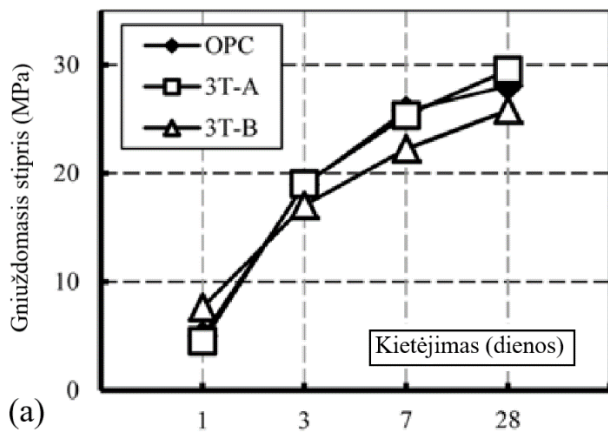
| Tipas | Įprastas portlandcementis (%) | TFT-LCD malta stiklo atliekos | |
|-------|-------------------------------|---|--|
| | | A tipas (88 μm dalelės), (%) | B tipas (150 μm dalelės), (%) |
| 0T | 100 | - | - |
| 3T-A | 97 | 3 | - |
| 3T-B | 97 | - | 3 |
| 5T-A | 95 | 5 | - |
| 5T-B | 95 | - | 5 |
| 10T-A | 90 | 10 | - |
| 10T-B | 90 | - | 10 |

Kaip matome (1.3 lentelėje) visi 3-ijų tipų stiklai buvo bandomi po 2 kartus, kur pirmojo bandinio cemento kiekis buvo pakeičiamas 3 % cemento masės 88 μm dalelių dydžio stiklu ir atitinkamai antrojo 3 % cemento masė pakeičiama su 150 μm dalelių dydžio stiklu. Ir tokia proporcija atitinkamai suformuojami likę bandiniai su 5 % cemento masės 88 μm ir 150 μm dalelių dydžio stiklais bei 10 % cemento masės 88 μm ir 150 μm dalelių dydžio stiklais. Bandinyje naudoto stiklo bei portlandcemenčio sudėtys pateiktos (1.4 lentelė).

1.4 lentelė. Cheminė tyrime naudotų medžiagų sudėtys [16]

| Pavyzdys | Cheminė sudėtis (%) | | | | | | | | Svoris |
|---------------------------|---------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|-------------------------------|------|--------|
| | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | B ₂ O ₃ | LOI | |
| Įprastas portlandcementis | 21,74 | 61,06 | 5,86 | 3,22 | 3,99 | 2,43 | - | 0,78 | 3,15 |
| TFT-LCD | 62,30 | 7,50 | 17,20 | - | 1,40 | - | 10,50 | 0,81 | 2,88 |

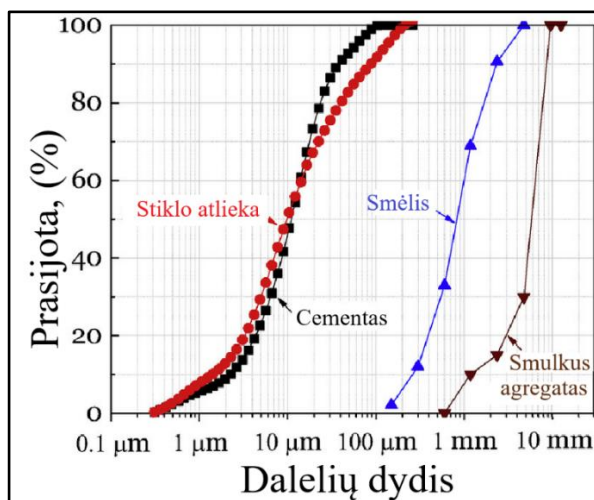
Rezultatai parodė, kad skiedinio su TFT-LCD (angl. thin-film transistor liquid-crystal display – plonasluoksnių tranzistorių skystųjų kristalų ekranas) stiklu gniuždomasis stipris pagerėjo, lyginant su įprastu skiediniu:



1.9 pav. (a)- mišinys su 3 % stiklo atliekos, (b)- mišinys su 5 % stiklo atliekos, (c)- mišinys su 10 % stiklo atliekos [16]

Gauti rezultatai parodė, jog skiedinio stipris su 88 μm stiklo milteliais buvo didesnis nei su 150 μm . Taip pat buvo padaryta išvada, jog padidėjęs kalcio silikato hidratų kiekis paskatino pucolaninę reakciją ir TFT-LCD stiklo miltelių kaip priedo panaudojimas buvo veiksmingas mažinant šarminės korozijos grėsmę [6][16].

Panašių rezultatų buvo pasiekta atliktame bandyme kurio metu stiklo atliekos dalelių dydis buvo iki 150 μm [6].



1.10 pav. Mišinio dalelių dydis [6]

Galima daryti prielaidą jog tokie rezultatai gauti suaktyvėjus pucolaninei reakcijai kurioje dalyvauja pakankamo dydžio stiklo dalelės chemiškai reaguodamos su kalcio hidroksidu ir taip papildo ir sujungia hidratacijos procesus. Toks stiklo panaudojimas mažina šarminės korozijos riziką bei akivaizdžiai gerina betono mechanines savybes. Remiantis atliktais bandymais malto stiklo dalelių dydis neturėtų viršyti 250 μm.

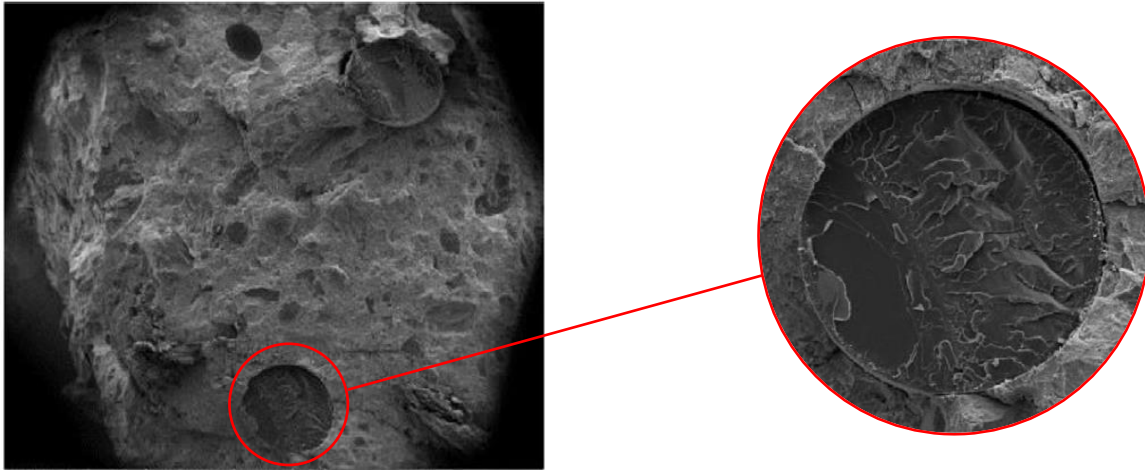
1.11. Šviesai laidus betonas.

Dėl didžiulio ekonomikos augimo pasaulyje sparčiai plečiasi infrastruktūra, didėja būstų poreikis, didėja pastatų aukštingumas, o su kartu su būstų augimu atsiranda iššūkių kaip efektyviai išnaudoti erdvę vietose, kur vienas gyvenamas pastatas užstoja kitą sudarydamas šviesos trūkumą. Dėl šių kylančių problemų smarkiai auga dirbtinių šviesos šaltinių poreikis, o kartu su juo eikvojama vis daugiau elektros energijos [31 – 35].

Kadangi betonas yra bene populiariausia statybinė medžiaga šių laikų statyboje, šviesai laidus betonas tampa vienu iš sprendimo būdų siekiant sumažinti elektros energijos suvartojimą, bei išspręsti tam tikras šviesos, apšvietimo trūkumo problemas [31 – 35].

Šviesai laidus betonas tai iš esmės yra betonas kuriame integruoti plastikiniai šviesai laidūs kabeliai arba pluoštas dar kitaip vadinami optinio pluošto kabeliais. Plastikinis optinis pluoštas yra lankstus ir skaidrus pluoštas, pagamintas iš gryno stiklo (silicio dioksido), jis veikia kaip "šviesos vamzdis", kuris perduoda šviesą tarp dviejų galų [33][35].

Nagrinęjant literatūrą matoma jog pagrindinė problema į betoną integruojant šviesai laidžius kabelius yra ta, jog betono struktūra susilpnėja, o tai lemia žemesnius betono mechaninius rodiklius, t.y. kuo daugiau šviesos betonas praleidžia tuo silpnesnė betono struktūra (1.11 pav.).



1.11 pav. Šviesai laidūs kabeliai betono struktūroje [31]

Remiantis literatūra matoma jog didinant šviesai laidžių kabelių kiekį betono paviršiuje atitinkamai silpnėja gniuždomasis betono stipris (1.5 lentelė).

1.5 lentelė. Bandinių su skirtingo smulkumo maltu stiklu tankiai [33]

| Šviesai laidžių kabelių kiekis % integruotas į betono gaminio paviršiaus plotą | 0% | 1% | 2% | 3% | 4% | 5% |
|--|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Gniuždomasis betono stipris Mpa | 47,2 | 43,8 | 42,7 | 40,7 | 38,9 | 38,1 |
| Spinduliuotė pereinanti per betono gaminį (Liuxai) | 0,0 | 220,0 | 258,0 | 295,0 | 321,0 | 375,0 |

Šviesai laidaus betono gamybos procesas yra beveik toks pat kaip ir įprasto betono. Skiriasi tik tai, kad klojinyje yra įterpiami šviesai laidūs optiniai pluoštai. Maži betono sluoksniai pilami vienas ant kito į tarpus vis įdedant šviesai laidaus pluošto ir taip šviesai laidus pluoštas išsidėsto per visą gaminio skerspjūvį. Tūkstančiai šviesai laidžių kabelių betone gali perduoti tiek natūralią tiek dirbtinę šviesą. Šviesai laidus betonas gaminamas į betono mišinį pridedant optinio pluošto nuo 4 % iki 5 % betono tūrio. Betono mišinys yra pagamintas iš smulkių užpildų ir jame nėra šiurkščių agregatų. Optinio pluošto storis gali būti įvairus nuo 2 μm iki 2 mm, kad atitektų konkrečius šviesos pralaidumo reikalavimus [34 – 35].

1.12. Literatūros analizės išvados.

Nors stiklo atliekos naudojamos labai plačiai, dėl šios atliekos didžiulio kiekio perdirbimo poreikis vis dar labai didelis. Stiklo atliekos panaudojimas dalinai pakeičiant iki šiol dažniausiai naudojamą cementinį rišiklį būtų svarbus žingsnis į priekį kuriant ekologiškai energiją taupančią ir ekonomišką infrastruktūros sistemą. Perspektyvus būdo dėka naudojant stiklo atlieką betone didesnę cemento kiekį pakeičiant stiklo milteliais visų pirma pasiekiamas mažesnis žaliavų panaudojimo kiekis, o kartu yra šalinamos ir stiklo atliekos.

Stiklo atliekos perdirbimas ir rūšiavimas jau pakankamai išvystyta technologija, tačiau reikia įvertinti ar energijos sąnaudos perdirbant stiklą yra vertos rezultato, panaudojant atlieką antrinėje gamyboje.

Norint gauti labai smulkių dalelių pasiskirstymą, reiktų eikvoti daug energijos malant stiklą. Norint tinkamai palyginti šiuos poveikius, energijos sąnaudos turi būti atitinkamai paskaičiuotos. Didžioji literatūros dalis neabejotinai parodė, kad betonas su perdirbtomis stiklo atliekomis yra perspektyvi statybinė medžiaga. Kai kuriuose tyrimuose įrodyta, kad smulkesnės stiklo dalelės (kalbant apie mikro dydžius) turi galimybę pagerinti įvairių rišiklių hidratacijos procesą (C-S-H gelis) [3][5].

Be to šaltiniai parodė jog daugumos tyrimų metu pasiekta teigiamų rezultatų, stiklas gaminiui suteikia geresnių mechaninių, ilgaamžiškumo savybių.

Stiklo atliekos jau iki šių dienų buvo, ir yra naudojamos statybos rinkoje, todėl tikslingi tyrimai, rezultatai gali atverti platesnes šių atliekų panaudojimo galimybes šioje rinkoje. Stiklo atliekos kaip rišiklio betone panaudojimas atneštų naudą siekiant mažinti CO₂ išmetamą kiekį mažinant cemento gamybą, tikslingiau naudojant gamtines žaliavas.

Atlikus literatūros analizę apibrėžta:

Tyrimo objektas– statybinio produkto privalumai naudojant stiklo atliekos kaip perdirbamos medžiagos savybes.

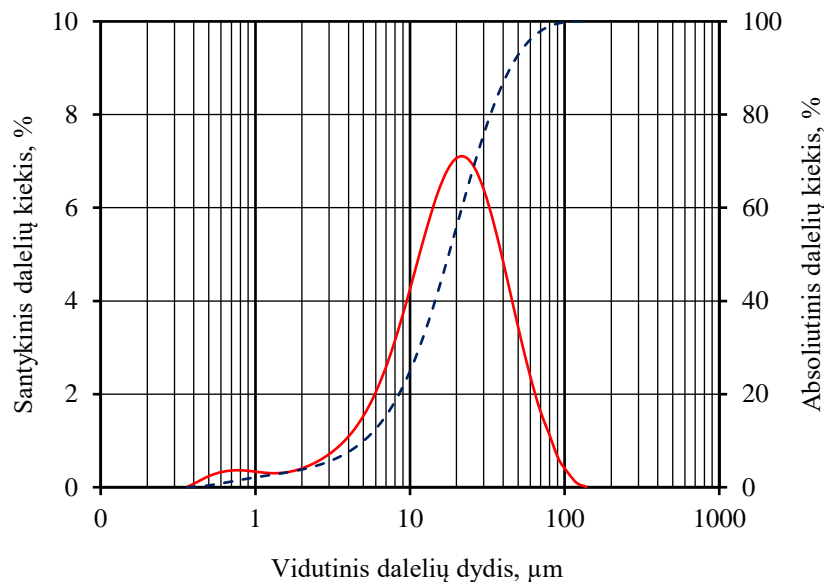
Tikslas – ištirti malto stiklo kaip atliekų įtaką gaminio mechaninėms, cheminėms bei fizikinėms savybėms, nustatyti šios atliekos panaudojimo galimybes cementinėse sistemose.

Uždaviniai:

1. Sukurti malto stiklo atliekų perdirbimo technologiją.
2. Ištirti malto stiklo atliekų įtaką betono mechaninėms ir fizikinėms savybėms.
3. Ištirti malto stiklo įtaką cemento hidratacijos procesui.
4. Ištirti malto stiklo atliekos įtaką betono atsparumui ardomajam šalčio poveikiui.

2. Tyrimų medžiagos

Portlandcementis. Eksperimentinių tyrimų metu naudotas vieno gamintojo portlandcementis, kurio dalelių pagal dydį pasiskirstymas atsispindi (2.1 paveiksle).



2.1 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoto portlandcemenčio dalelių pasiskirstymas pagal skersmenis

Pagrindinės baigiamajame darbe naudoto portlandcemenčio fizikinės bei mechaninės savybės pateiktos (2.1 lentelėje).

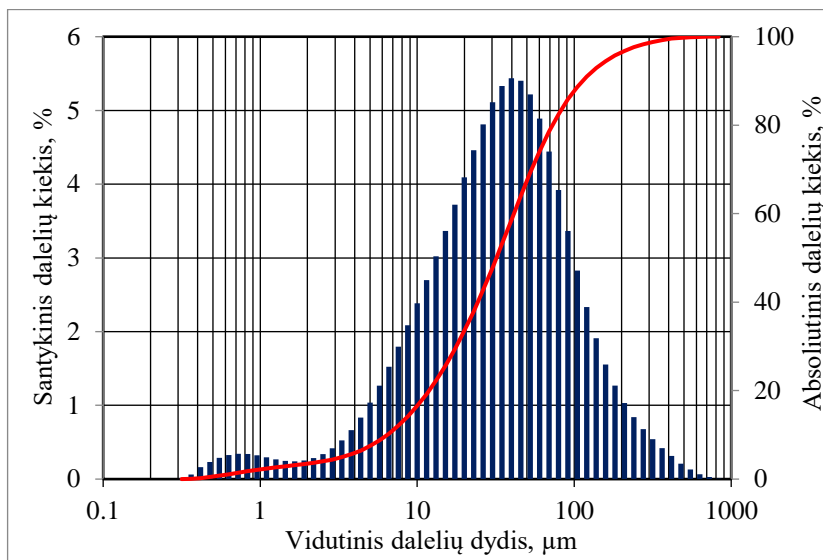
2.1 lentelė Portlandcemenčio, fizikinės ir mechaninės savybės

| Portlandcementis | |
|---|-------------|
| Tūrio pastovumas mm | ≤ 1 |
| Normalaus tirštumo tešla, % | 31,0 |
| Rišimosi (pradžia/ pabaiga) min. | 100 / 205 |
| Lenkimo stipris, MPa (po 2/28 p.) | - |
| Gniuždymo stipris, MPa (po 2/28 p.) | 45,0 / 62,0 |
| Savitasis tankis, kg/m ³ | 3150,0 |
| Piltinis tankis, kg/m ² | - |
| Savitasis paviršius, m ² /kg | 520,0 |

Mikroužpildai. Eksperimentinių tyrimų metu naudoti mikroužpildai tokie kaip SiO₂ mikrodulkės, bei maltas stiklas.

SiO₂ mikrodulkės. Tyrimams naudotos SiO₂ mikrodulkės. Tai ferosilicio lydinių gamybos metu susidaranti labai smulkios dulkės turinčios didelį amorfinio SiO₂ kiekį. Savitasis SiO₂ dalelių tankis

atitinka 2120 kg/m^3 , piltinis tankis 255 kg/m^2 ir savitasis paviršius, $1920 \text{ m}^2/\text{kg}$. Silicio mikrodulkių dalelių pasiskirstymas pagal dydį matomas (2.2 paveiksle).



2.2 pav. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų silicio mikrodulkių dalelių pasiskirstymas pagal skersmenis

Maltas stiklas. Eksperimentiniuose tyrimuose naudotas iš įvairios stiklo taros rutuliniu malūnu sumaltas stiklas, bei maltas stiklas, kuris gaunamas pramoniniu būdu sumalant langų stiklą.

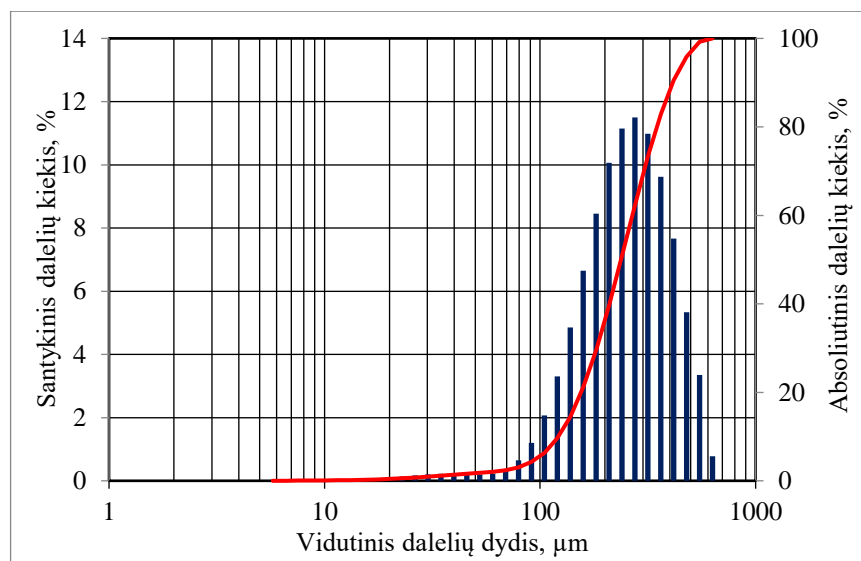
Užpildai. Tyrimuose naudotas betono inertinis mikroužpildas kvarcinis smėlis.

Kvarcinis smėlis. Tyrimuose naudotas užpildas, kvarcinis smėlis, fizikinės ir mechaninės užpildo savybės pateiktos (2.2 lentelėje).

2.2 lentelė Kvarcinio smėlio fizikinės ir mechaninės savybės

| frakcija mm | savitasis tankis kg/m^3 | piltinis tankis kg/m^3 | molio ir dulkių kiekis % | kietumas pagal Moso skalę |
|--------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 0/1 ir 0/1,6 | 2670 | 160 | 0,5 | 7 |

Kvarcinio smėlio dalelių pasiskirstymas pagal dydį matomas (2.2 paveiksle)



2.2 pav. Eksperimentiniuose tyimuose naudoto kvarcinio smėlio dalelių pasiskirstymas pagal skersmenis

Cheminiai priedai. Tyrimuose naudotas cheminis priedas superplastiklis.

Superplastiklis. Šio cheminio priedo veiklioji medžiaga – polikarboksilato eteriai, pagrindinės priedo savybės pateiktos (2.3 lentelėje).

2.3 lentelė Tyrimams naudoto superplastiklio fizikinės ir cheminės savybės

| Žymėjimas | Tankis, g/cm ³ | Vandenilio jonų koncentracija, pH | Chloridų kiekis, % | Šarmų kiekis (pagal masę), % |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|
| Glenium ACE 430 | 1,06 ± 0,02 | 5,5±1,5 | ≤ 0,10 | ≤ 0,6 |

3. Tyrimų metodai

3.1. Savitasis paviršius ir dalelių pagal dydį pasiskirstymas

Maltų medžiagų granulimetrinė sudėtis nustatyta lazeriniu granulimetru „Mastersizer 2000“. Kaip dispersinė terpė naudotas izopropanolis, o kietosios medžiagos kiekis suspensijoje sudarė 13 – 15 %. Dalelių dispergavimo ultragarsu trukmė – 100 s, o matavimo trukmė – 15 s. Naudotų medžiagų savitasis paviršius buvo nustatytas oro pralaidumo metodu Bleino prietaisu pagal LST EN 196-6:2019.

3.2. Cemento tešlos paruošimas

Cemento tešlos paruošimui buvo naudotos 4 skirtingos sudėty, kurios pateiktos (3.1 lentelėje). Maišymas atliktas rankiniu būdu.

3.1 lentelė Cemento tešlos sudėty

| Sudėty | Kiekis g | | | | | Pastabos |
|---|----------|----------|------------------------------|----------------|-----------------|---|
| | Vanduo | Cementas | SiO ₂ mikrodulkės | Maltas stiklas | Superplastiklis | |
| C735 | 22,0 | 74,0 | - | - | 4,0 | C735-735 kg/m ³ |
| C735+SiO ₂ (9%) | 20,0 | 67,0 | 9,0 | - | 4,0 | SiO ₂ - silicio mikrodulkės |
| C735+GP (30%) | 15,0 | 52,0 | - | 30,0 | 3,0 | GP- maltas stiklas (angl. glass powder) |
| C735+SiO ₂ (6,5%)+GP (2,75%) | 14,7 | 49,0 | 6,5 | 27,4 | 2,4 | |

3.2. Cemento hidratacijos tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetrijos bandymu

Pusiau adiabatinio kalorimetrijos bandymo metu buvo matuojamas temperatūros pokytis ir nustatomas cemento tešlos su aktyviaisiais cheminiais ir mineraliniais priedais kietėjimo, rišimosi laikas. Metodas atliktas vadovaujantis LST EN 196-9:2010.

3.3. Betono mišinio paruošimas

Betono mišinio sudėtį sudarė cementas, aktyvieji mineraliniai mikroužpildai, taip pat buvo naudojami ir sausieji užpildai. Vanduo ir cheminiai priedai buvo dozuojami pagal masę. Dalis cheminių priedų buvo ištirpinami vandenyje ir į mišinį įmaišomi kartu su vandeniu, likusi dalis buvo įmaišoma be vandens. Maišymui buvo naudojama laboratorinė maišyklė, kurios pagrindiniai parametrai: 2 maišymo režimai: 140±5 ir 285±10 apsisukimai per minutę, maišyklės tūris – 5 litrai.

3.2 lentelė Mišinių sudėtys kg/m³

| Komponentas | Sudėtys | | | |
|------------------------------|---------|----------------------------|---------------|---|
| | C735 | C735+SiO ₂ (9%) | C735+GP (30%) | C735+SiO ₂ (6,5%)+GP (2,75%) |
| V/C | 0,25 | | | |
| Kiekis kg/m ³ | | | | |
| Vanduo | 184,0 | 184,0 | 184,0 | 184,0 |
| Cementas | 735,0 | 735,0 | 735,0 | 735,0 |
| Kvarcinis smėlis | 1473,0 | 1374,0 | 1061,0 | 962,0 |
| SiO ₂ mikrodulkės | - | 99,0 | - | 41,2 |
| Maltas stiklas | - | - | 412,0 | 99,0 |
| Superplastiklis | 36,7 | 36,7 | 36,7 | 36,7 |

Betono mišinio paruošimas ir atitinkamo proceso trukmė pateikta (3.3 lentelėje) mišinio paruošimo trukmė iki 8 min.

3.3 lentelė Betono mišinio maišymo seka

| Laikas, s | Maišymo eiliškumas |
|-----------|--|
| 60 | Sausųjų komponentų homogenizavimas |
| 30 | Supilamas visas vanduo ir 50 % superplastiklio |
| 60 | Mišinio homogenizavimas |
| 240 | Pauzė |
| 30 | Supilama 50 % likusio superplastiklio |
| 60 | Homogenizavimas |

3.4. Betono susitraukimo deformacijų matavimas

Pradinės betono susitraukimo deformacijos buvo nustatytos iškart po išformavimo, po 24 valandų nuo mišinio užmaišymo pradžios. Susitraukimo deformacijoms matuoti buvo suformuoti 40×40×160 mm bandiniai. Viena dalis išformuotų bandinių buvo laikomi laboratorijos sąlygomis (santykinė oro drėgmė 40–60 %, aplinkos temperatūra – 20±2°C), o kita dalis bandinių buvo kietinti šutinimo kameroje 80 °C (šutinimo režimas 1+44+3 h), o po to taip pat laikomi laboratorijos sąlygomis (santykinė oro drėgmė 40–60 %, aplinkos temperatūra – 20±2 °C). Matavimai atlikti laboratoriniu dilatometru.

Pagrindinės dilatometro savybės (Testing GmbH): tikslumas – 0,001 mm, prietaisas tenkina LST EN 12617-4:2003, LST EN 1367-4:2008 ir LST EN 12808-4:2009 reikalavimus.

3.5. Betoninių bandinių formavimas ir kietinimas

Sukietėjusio betono savybėms tirti buvo suformuotos 40×40×160 mm prizmelės bandiniai. Supiltas į formas mišinys buvo tankinamas 2 minutes ant laboratorinio vibracinio stalo. Sutankintas mišinys 24 h buvo laikomas patalpoje (20±2 °C). Po 24 h išformavus bandinius dalis bandinių buvo laikomi vandenyje, dalis kietinti šutinimo kameroje 80 °C (šutinimo režimas 1 + 44 + 3 h). Po šutinimo likusį laiką iki bandymo bandiniai buvo laikomi vandenyje (20 ± 2 °C).

3.6. Lenkimo ir gniuždymo stipris

Lenkimo (naudojant 40×40×160 mm formos prizmes) ir gniuždymo stipris (tas pačias prizmes po lenkimo bandymo, kur gniuždomasis plotas 60x40mm) buvo nustatytas po 28 parų, atitinkamai pagal LST EN 12390-5:2019 ir LST EN 12390-4:2000. Prieš lenkimo/gniuždymo bandymus siekiant išgauti lygiagrečius paviršius, bandiniai buvo šlifuojami rankiniu būdu. Bandinių paviršių lygiagretumas patikrintas pagal LST EN 12390-1:2012. Pagrindinės hidraulinio preso savybės maksimali spaudžiamoji jėga – 600 kN.

3.7. Betono atsparumo šalčiui tyrimas vienpusiu šaldymu

Vienpusio šaldymo bandymui buvo naudojami 8 bandiniai, kurių sudėtys pateiktos (3.2 lentelėje). Bandinių matmenys (160x40 ± 3) mm. Bandiniai buvo užmerkami į voneles 3% koncentracijos druskos tirpale (NaCl) apsemiant bandinio paviršių (10 ± 3) mm. Bandiniai buvo cikliška šaldomi ir šildomi bei periodiškai tikrinama, ar bandinių paviršiuje neatsiranda irimo požymių. Ciklo trukmė (24 ± 0,25) h. Bandymas atliktas pagal LST 1428-19:2016.

4. Tyrimų rezultatai

4.1. Malto stiklo paruošimas

Tyrimų metu naudotas įvairių rūšių stiklas, tai įvairios stiklo taros surinktas, maltas stiklas bei pramoniniu būdu maltas langų stiklas. Paruošiant įvairios taros malto stiklo žaliavą visų pirma reikėjo ją sukaupti, prieš trupinant nuo stiklo buvo pašalinamos visos etiketės, lipdukai, kamšteliai bei kiti nešvarumai, kurie nėra priimtini betono gamyboje. Maltas stiklas buvo smulkinamas dviem etapais: stiklo žaliava buvo smulkinama plaktuku iki duženų kurių dydis siekė 1 – 5 cm, o po to malama rutuliniu malūnu (4.1 pav.)

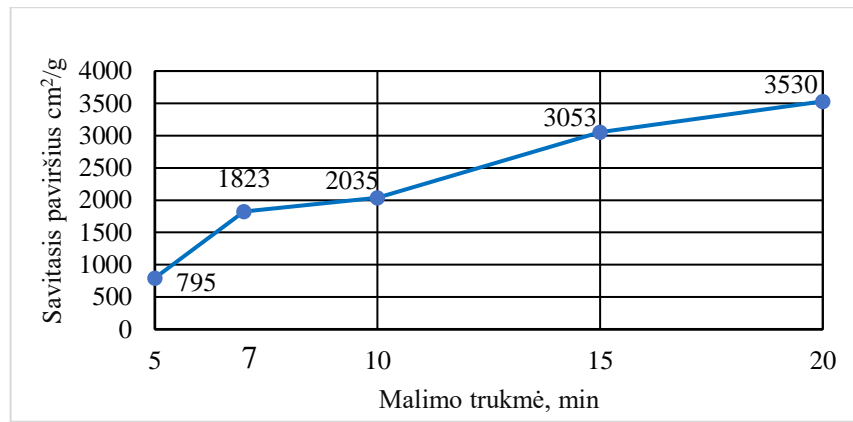


4.1 pav. Stiklo atliekos paruošimo technologija (sudaryta autoriaus)

Po to stiklas buvo malamas laboratoriniu, rutuliniu malūnu. Pagrindiniai rutulinio malūno parametrai: būgno skersmuo – 70 cm, būgno ilgis – 52 cm, rutulio skersmuo – 6,35 cm, rutulio masė – 1,030 kg, rutulių skaičius malimo metu – 131 vnt. Kiekvieno malimo metu buvo malama 2 kg medžiagos suskirstant malimus pagal malimo trukmę į: 5, 10, 15 ir 20 minučių malimo trukmės maltą stiklą.

4.2. Stiklo savitojo paviršiaus matavimo rezultatai

Remiantis oro pralaidumo metodu, Bleino prietaiso pagalba gautais duomenimis, išskaičiuojamas stiklo dalelių smulkumas ir sudaroma priklausomybė tarp malto stiklo smulkumo ir malimo trukmės.

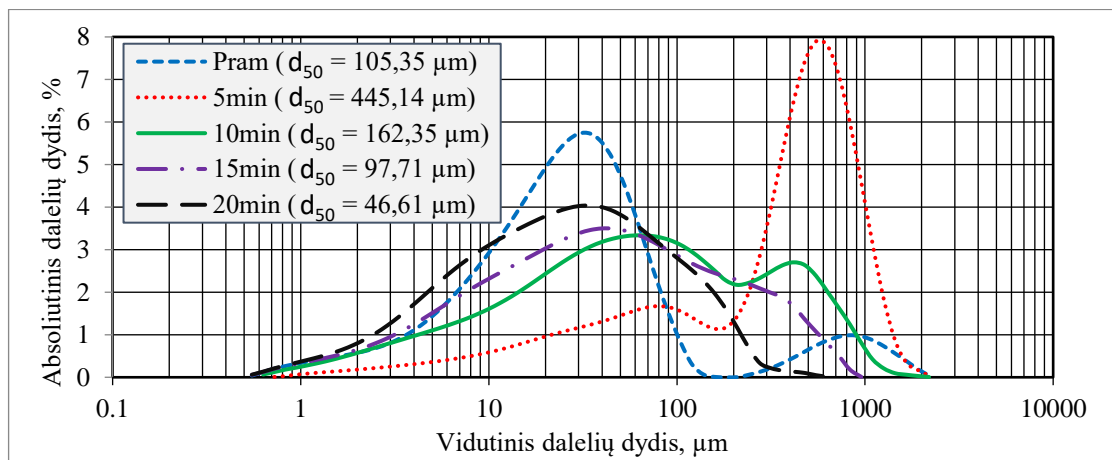


4.2.pav. Stiklo atliekos savitojo paviršiaus priklausomybė nuo malimo trukmės

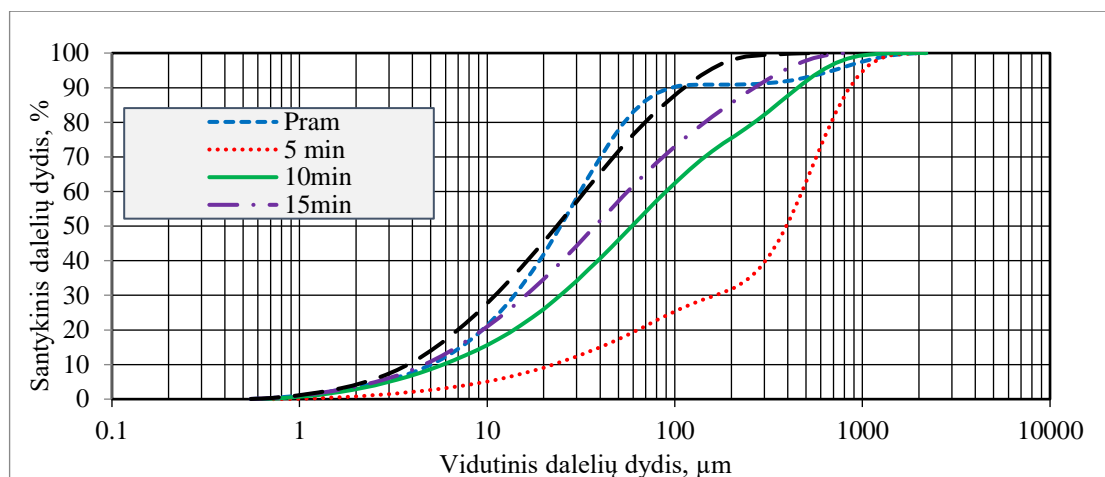
Bleino prietaisu įvertinus pramoniniu būdu maltą langų stiklą matoma jog kreivėje pramoniniu būdu malto stiklo smulkumo reikšmė išsidėstė tarp 5 ir 10 min maltos stiklo atliekos reikšmių (4.2 pav.). Ties pramoniniu būdu malto langų stiklo smulkumo reikšme matomas kreivės lūžis, kuris lemia, jog optimaliausia malimo trukmė yra 7 min, būtent tokio smulkumo žaliava yra pramoniniu būdu maltas langų stiklas.

4.3. Stiklo granulimetrinės sudėties matavimo rezultatai

Atlikus granulimetrinės sudėties matavimą suskaičiuotas vidutinis dalelių dydis d_{50} kuris matomas (4.3 pav.) , vidutinis dalelių dydis didėja mažėjant malimo trukmei. Šiuo atveju granulimetrinė sudėtis Pram. – pramoniniu būdu maltas stiklas, atitinka 7 minučių malimo trukmę.



4.3 pav. Stiklo atliekos absoliutinio dalelių pagal dydį pasiskirstymo priklausomybė nuo vidutinio dalelių dydžio



4.4 pav. Stiklo atliekos santykinio dalelių pagal dydį pasiskirstymo priklausomybė nuo vidutinio dalelių dydžio

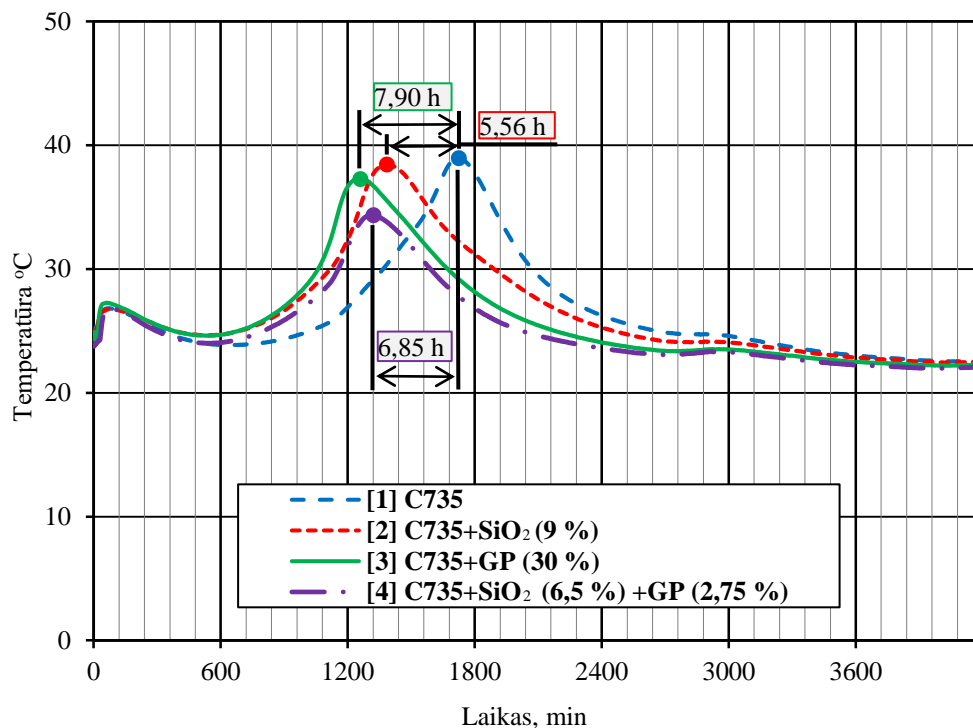
4.4. Rišklio hidratacijos tyrimo pusiau adiabatiniu kalorimetrijos bandymu rezultatai

Kalorimetrijos tyrime buvo tiriamos 4 skirtingų sudėčių cemento tešlos, pagrindiniai rišimosi pradžios ir pabaigos rodikliai bei temperatūros pateikiamos (4.1 lentelėje).

4.1 lentelė. Cemento tešlos rišimosi pradžios ir pabaigos rodikliai

| Sudėtys | Laikas, min / h | | Temperatūra °C | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Rišimosi pradžioje | Rišimosi pabaigoje | Rišimosi pradžioje | Rišimosi pabaigoje |
| C735 | 636 / 10,6 | 1724 / 28,7 | 23,8 | 39,0 |
| C735+SiO ₂ (9%) | 557 / 9,3 | 1390 / 23,2 | 24,6 | 38,4 |
| C735+GP (30%) | 557 / 9,3 | 1250 / 20,8 | 24,6 | 37,3 |
| C735+SiO ₂ (6,5%)+GP (2,75%) | 557 / 9,3 | 1313 / 21,9 | 24,0 | 34,4 |

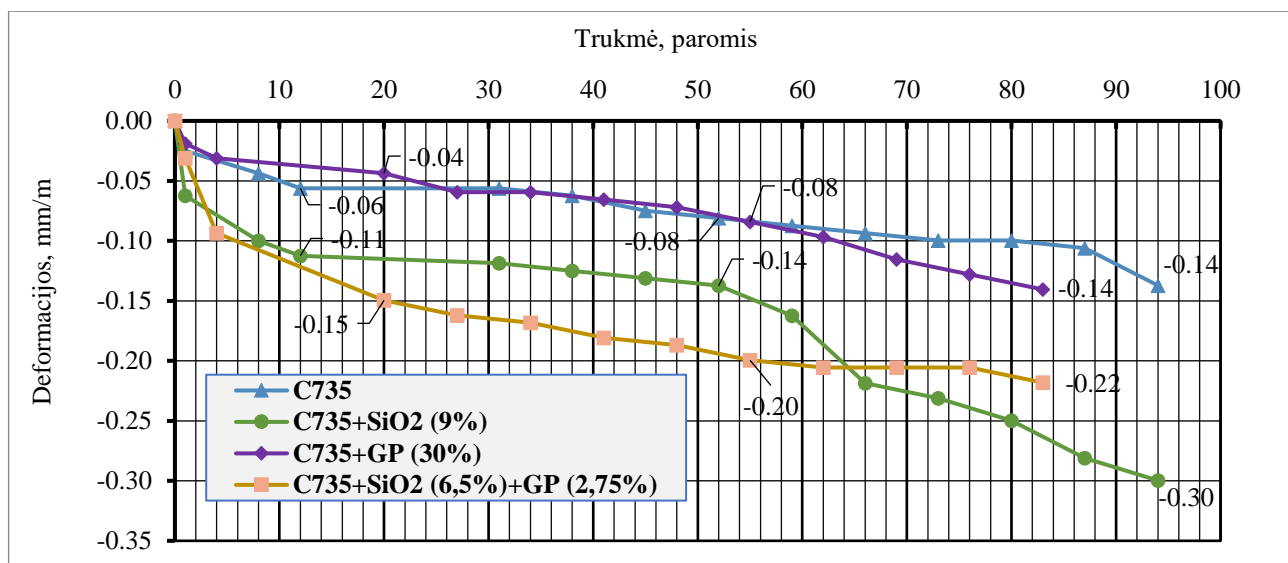
Atlikus pusiau adiabatiniu kalorimetru tyrimą pastebėta, kad cemento mišinio kuriame panaudota 30 % malto stiklo rišimosi laikas sutrumpėjo 7,9 valandos (4.5 pav.). Kiek lėtesnė rišimosi trukmė užfiksuota sudėtyje kurioje malto stiklo yra 2,75 % ir silicio mikro dulkių – 6,5 %, šio mišinio rišimosi trukmė sutrumpėjo atitinkamai 6,85 valandos (4.5 pav.). Visai nenaudojant stiklo atliekos, t.y., naudojant tik silicio mikrodulkes, rišimosi laikas gautas dar kiek trumpesnis, atitinkamai 5,56 valandos. (4.5 pav.). Matoma tendencija, jog didinant stiklo atliekos kiekį mišinyje, gaunamas spartesnis rišimosi laikas.



4.5 pav. Temperatūros priklausomybė nuo rišimosi laiko

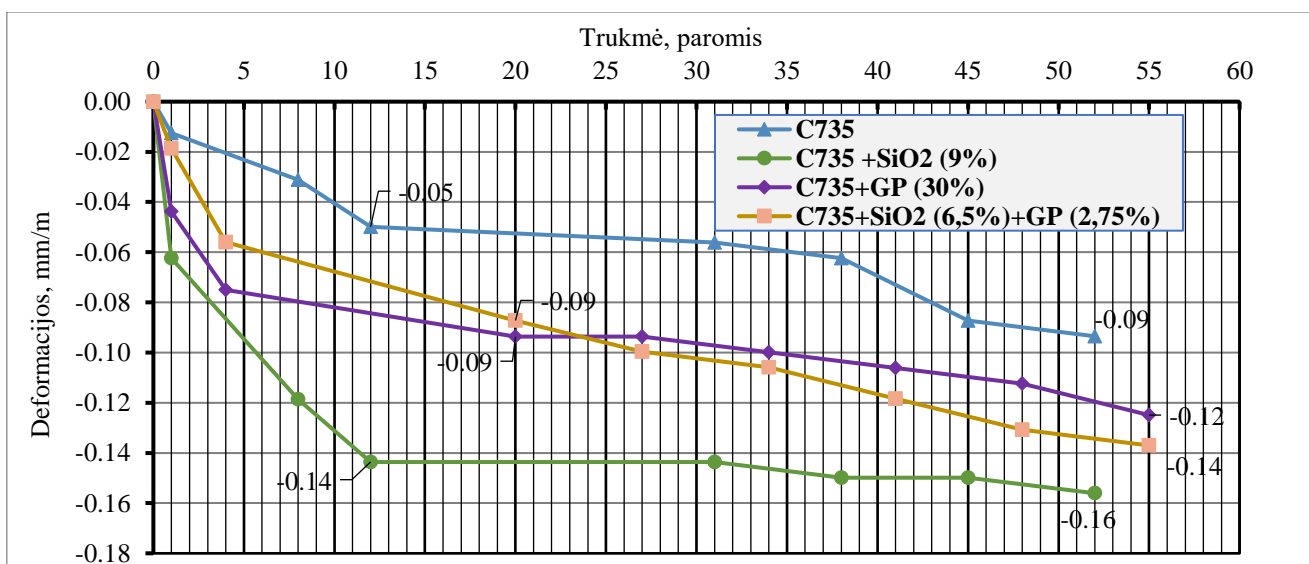
4.5. Betono susitraukimo deformacijų matavimo rezultatai

Stebint betono susitraukimą pastebėta, jog tiek betono mišiniuose, kuriuose buvo panaudotas maltas stiklas, tiek betono mišiniuose be malto stiklo susitraukimo deformacijos, vertinant, jog bandiniai buvo apdoroti termiškai (1 + 44 + 3 h), reikšmės po 50 parų buvo labai panašios (apie 0,11 mm/m) ir visą matavimo laikotarpį proporcingai didėjo (4.6 pav.). Žvelgiant į tolimesnį deformacijų kitimą, terminiu būdu apdoroti bandiniai toliau rodė proporcingą susitraukimą. Po 83 parų bandinių su stiklo atliekomis pasiektas susitraukimas buvo apie 0,20 mm/m, o bandinių be stiklo atliekos– apie 0,14mm/m (4.6 pav.)



4.6 pav. Terminiū būdu apdorotų bandinių deformacijų kitimas laiko atžvilgiu

Bandiniai be terminio apdorojimo parodė labai panašias susitraukimo deformacijas taip pat tiek mišiniuose su stiklo atliekomis tiek mišiniuose be, po 41 paros deformacijos siekė apie 0,11 mm/m (4.7 pav.). Po 55 parų bandinių su stiklo atliekomis pasiektas galutinis susitraukimas buvo vidutiniškai 0,13mm/m, o bandinių deformacija be stiklo atliekos siekė apie 0,12mm/m (4.7 pav.)



4.7 pav. Terminiū būdu neapdorotų bandinių deformacijų kitimas laiko atžvilgiu

4.6. Lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio rezultatai

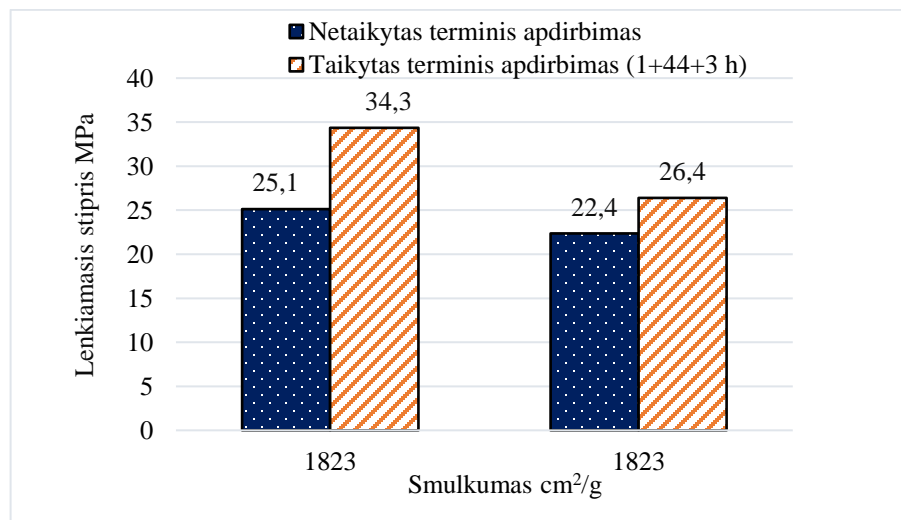
Prieš pradėdant lenkimo ir gniuždymo bandymus, bandiniai buvo pasverti, išmatuoti, nustatytas bandinių tankis, duomenys pateikti (4.2 lentelėje)

4.2 lentelė. Bandinių, su skirtingo smulkumo malto stiklu tankiai

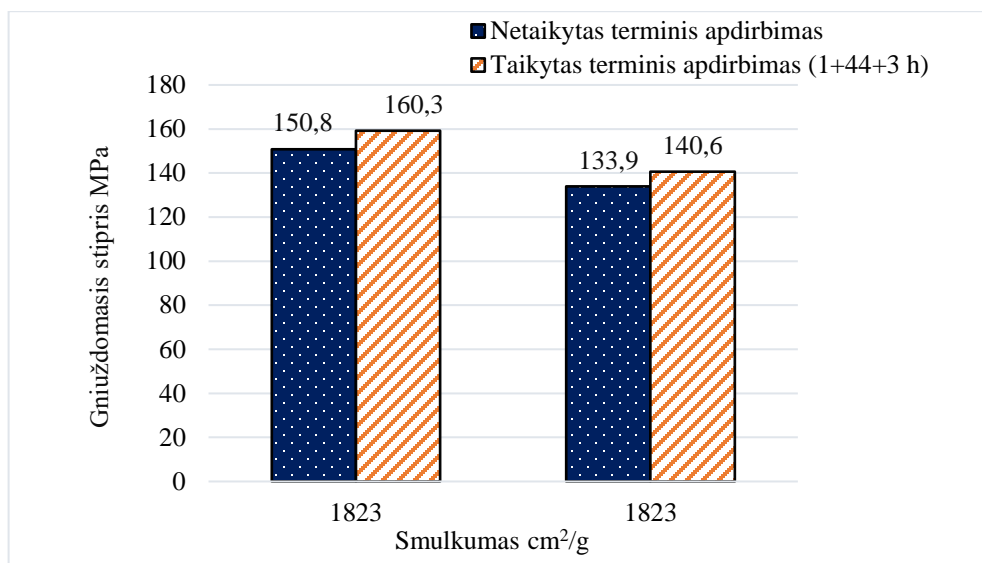
| Naudotas maltas stiklas pagal malimo trukmę | Savitasis paviršius cm^2/g | Betono tankis | |
|---|--|--|--|
| | | Tankis ρ (kg/m^3) su terminiu apdirbimu | Tankis ρ (kg/m^3) be terminio apdirbimo |
| 5 min | 795 | 2350 | 2340 |
| 7 min (maltas pramoniniu būdu) | 1823 | 2400 | 2330 |
| 10 min | 2035 | 2040 | 2040 |
| 15 min | 3053 | 2270 | 2360 |
| 20 min | 3530 | 2270 | 2150 |

Panaudojus pramoniniu būdu maltą langų sticlą kurio smulkumas siekia $1823 \text{ cm}^3/\text{g}$ buvo atlikti lenkimo ir gniuždymo bandymai, remiantis gautais duomenimis sudarytos gniuždomojo ir lenkiamojo stiprių diagramos.

Vertinant gautas reikšmes matoma, kad terminiu būdu (1 + 44 + 3 h) apdoroti bandiniai parodė geresnius rezultatus tiek lenkiant tiek gniuždant, didžiausias stiprumas lenkiant pasiektas – 34,3 MPa (4.8 pav.), stiprumas gniuždant – 150,8 MPa (4.9 pav.)



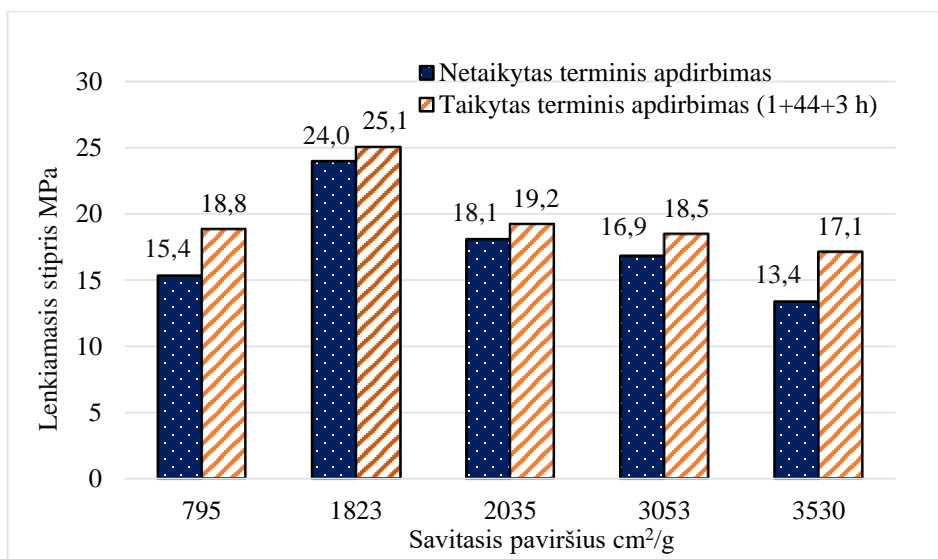
4.8 pav. Malto stiklo smulkumo įtaka betono lenkiamajam stipriui



4.9 pav. Malto stiklo smulkumo įtaka betono gniuždomajam stipriui

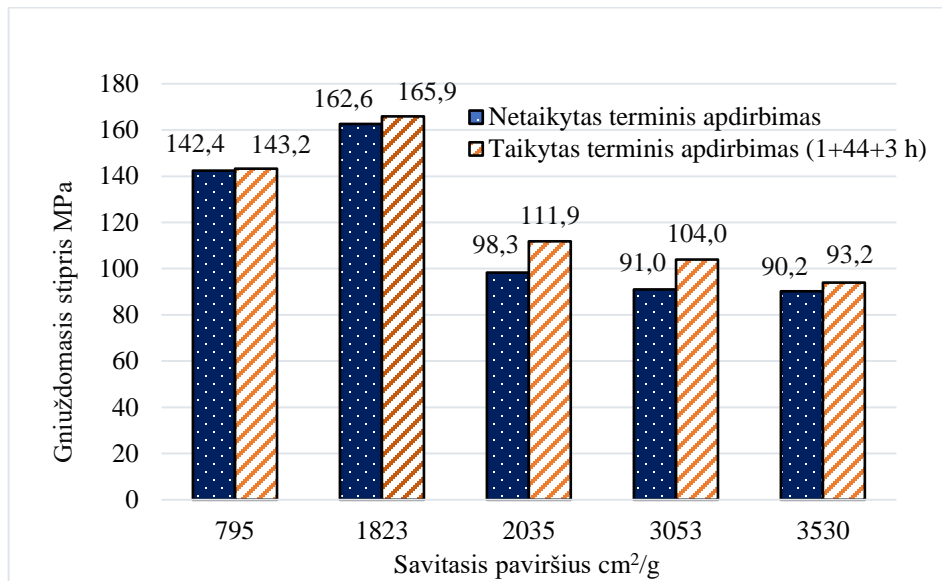
Panaudojus pramoniniu būdu maltą langų, bei rutuliniu malūnu maltą taros lenkimo ir gniuždymo bandymai parodė kiek kitokius rezultatus nei buvo tikėtasi.

Visi bandiniai tiek apdoroti terminiu būdu (1 + 44 + 3 h) tiek bandiniai be terminio apdoravimo kuriuose buvo panaudotas maltos taros stiklas parodė labai prastus rezultatus lyginant su bandiniais kuriuose naudotas pramoniniu būdu maltas langų stiklas. Tiek lenkiant (4.10 pav.) tiek gniuždant (4.11 pav.), išskyrus bandinius kuriuose buvo naudotas kitos rūšies stiklas (pramoniniu būdu maltas langų stiklas).



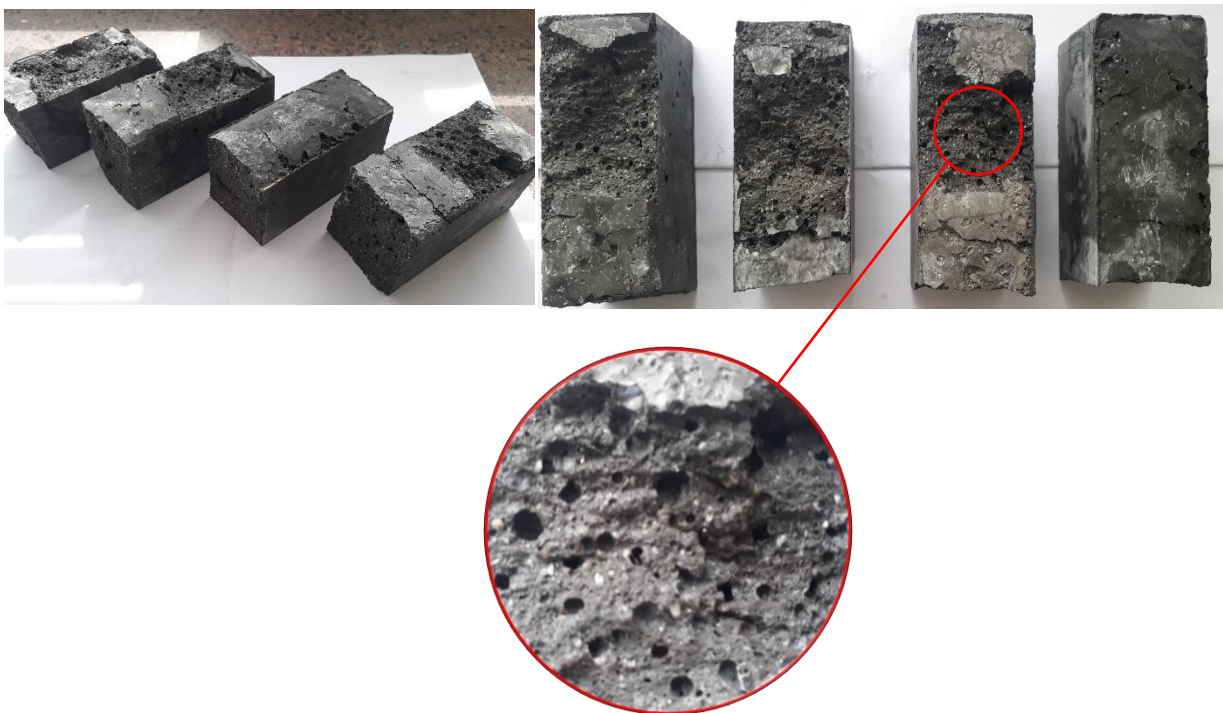
4.10 pav. Malto stiklo smulkumo įtaka betono lenkiamajam stipriui

Rezultatai parodė jog didžiausias stiprumas gniuždant buvo pasiekti naudojant pramoniniu būdu malto langų stiklo atlieką kurios smulkumas siekia 1823 cm³/g (4.10, 4.11 pav.)



4.11 pav. Malto stiklo smulkumo įtaka betono gniuždomajam stipriui

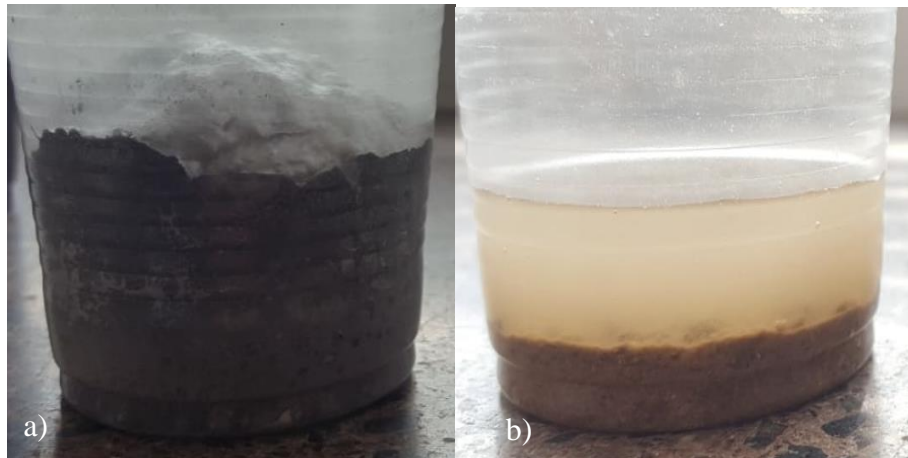
Atlikus lenkiamojo bei gniuždomojo stiprumo bandymus buvo pastebėta jog bandiniai kuriuose buvo naudojama malta stiklo tara pasireiškė labai porėta struktūra, išpūtimas (4.12 pav.)



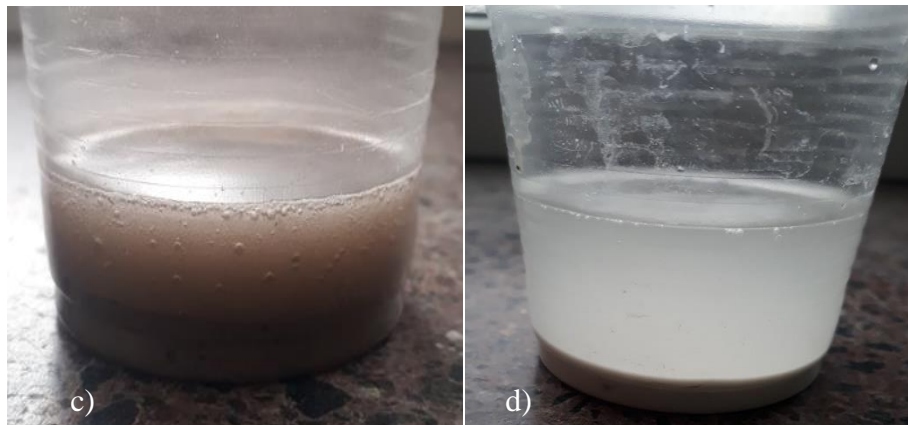
4.12 pav. Bandinių su malta stiklo tara porėta struktūra

Siekiant patikrinti kokią įtaką galėjo turėti stiklo atliekos betono porų atsiradimui buvo atliktas bandymas panaudojant Natrio hidroksido Na(OH) tirpalą. Na(OH) tirpalu buvo užpilami 4 bandiniai. Pirmajame bandyta aliuminio pudra, antrame bandinyje naudotas kvarcinis smėlis, trečiame bandinyje maltos stiklo taros atliekos ir ketvirtajame bandinyje pramoniniu būdu malto langų stiklo atliekos.

Pirmasis bandinys su aliuminio pudra parodė cheminę reakciją kurios metu užpylus Na(OH) tirpalą po 10 – 15 sekundžių aliuminio pudra pradėjo putoti, išskirti deguonį (4.13 pav. a)



4.13 pav. 1M NaOH tirpalo įtaka a) aliuminio pudrai, b) kvarciniam smėliui



4.14 pav. 1M NaOH tirpalo įtaka c) maltos stiklo taros atliekai, b) pramoniniu būdu maltam langų stiklui

Antrasis bandinys kuriam panaudojome tiesiog užpildą, kvarcinį smėlį kaip matome (4.13 pav. b) neparodė jokios reakcijos, oro burbuliukai nesusidarė praėjus net ir 10 minučių.

Trečiasis bandinys c) su maltos taros stiklo atliekomis taip pat parodė deguonies išskyrimo reakciją kuri po Na(OH) tirpalo poveikio net ir praėjus 10 min vis dar vyko, matėsi kaip iš užpildo bandinio kilo oro burbuliukai (4.14 pav. c)

Siekiant įsitikinti jog maltos taros stiklo reakcija nėra įprastas reiškinys stiklo atliekomis patikrinome ir ketvirtąjį bandinį (4.14 pav. d), tai pramoniniu būdu maltas stiklas, kuris kaip ir įtarėme neparodė panašios reakcijos su Na(OH) tirpalu, kurią matėme užpylę maltos stiklo taros atlieką (4.15 pav.)



4.15 pav. Aliuminio pudros ir maltos stiklo taros reakcijos į Na(OH) tirpalą

4.7. Betono atsparumo šalčiui tyrimas vienpusiu šaldymu

Vienpusio šaldymo bandymui buvo naudojami 4-ių skirtingų sudėčių 8 bandiniai po 2 vnt. (vienas su terminiu apdirbimu kitas be terminio apdirbimo) (4.16 pav. – 4.19 pav.). Prieš talpinant bandinius į šaldymo kamerą bandiniai buvo išmatuoti, pasverti, nustatyti bandinių tankiai, kurie pateikti (4.3 lentelėje). Po 56 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3% NaCl tirpale, kurie atitinka apie 225 šaldymo ir atšildymo ciklų natūraliame vandenyje bandiniai buvo ištraukti iš šaldymo kameros. Ištraukus bandinius vizualiai buvo įvertintas šaldytas, atšildytas paviršius. Pirmasis bandinys, kuriame nebuvo stiklo atliekos, tai bandinys a) kurio sudėtis C735 (735kg/m^3). Šio bandinio paviršius parodė vizualiai didžiausias šaldymo ir atšildymo sukeltų ciklų pažaidas (4.16 pav.)

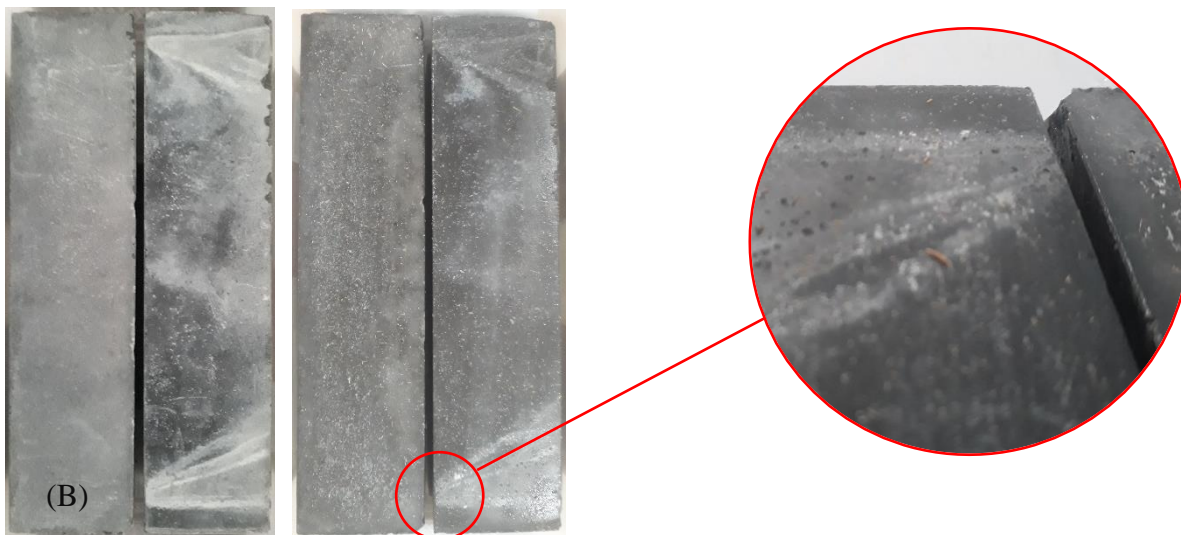
4.2 lentelė. Paviršinio šaldymo bandinių tankiai

| Bandinys | Terminis apdirbimas (1+44+3 h) | Tankis ρ (kg/m ³) |
|----------|--------------------------------|------------------------------------|
| (A).NT | Netaikytas | 2346 |
| (A).T | Taikytas | 2337 |
| (B).NT | Netaikytas | 2387 |
| (B).T | Taikytas | 2311 |
| (C).NT | Netaikytas | 2312 |
| (C).T | Taikytas | 2302 |
| (D).NT | Netaikytas | 2314 |
| (D).T | Taikytas | 2339 |



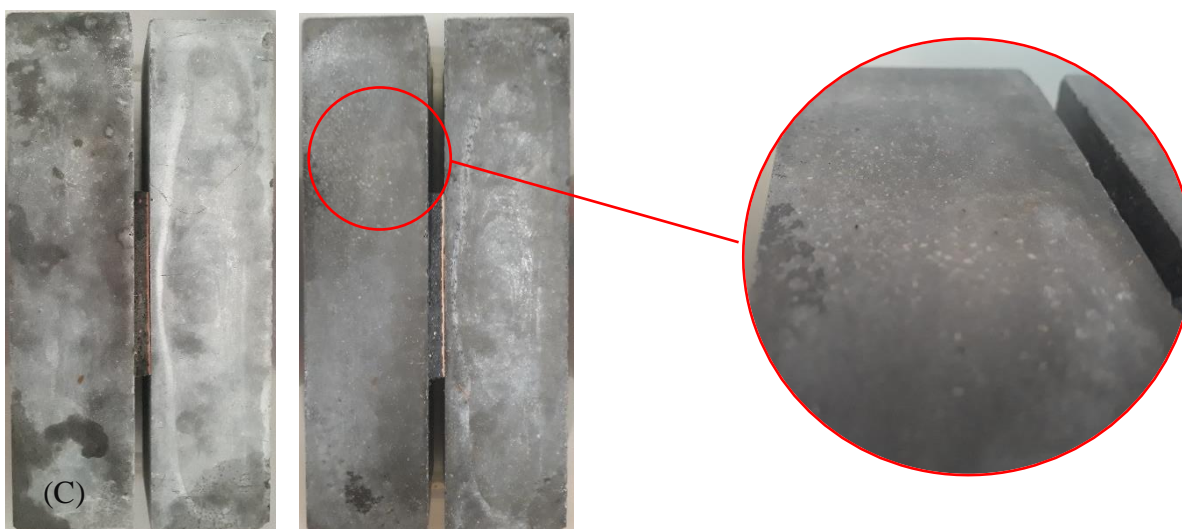
4.16 pav. (A) C735 (cementas), bandinys prieš ir po šaldymo.

Antrasis bandinys, kuriame stiklo atliekos taip pat nebuvo, tačiau buvo dedama silicio mikrodulkių 9%, bandinys (B) kurio sudėtis C735 SiO₂ (9%). Šio bandinio paviršiuje tam tikrose vietose taip pat buvo galima įžiūrėti šaldymo, atšildymo sukeltų ciklų pažaidas (4.17 pav.)



4.17 pav. (B) C735+SiO₂ (9%) (cementas ir SiO₂ mikrodulkės), bandinys prieš ir po šaldymo.

Trečiasis bandinys, kurio sudėtyje buvo naudota 30% stiklo atliekos, bandinys (C) kurio sudėtis C735+GP (30%). Šio bandinio paviršiuje nebuvo matoma jokių šaldymo ir atšildymo sukeltų pažeidimų lyginant su bandiniais prieš šaldymą (4.18 pav.)



4.18 pav. (C) C735+GP (30%) (cementas ir maltas stiklas), bandinys prieš ir po šaldymo.

Ketvirtasis bandinys, kurio sudėtyje buvo naudota tiek stiklo atlieka tiek silicio mikrodulkės atitinkamai po 2,75% ir 6,5%, bandinys (D) kurio sudėtis C735+SiO₂ (6,5%)+GP (2,75%). Šio bandinio paviršiuje taip pat nebuvo matoma jokių šaldymo ir atšildymo sukeltų paviršiaus pokyčių lyginant su bandiniais prieš šaldymą (4.18 pav.)

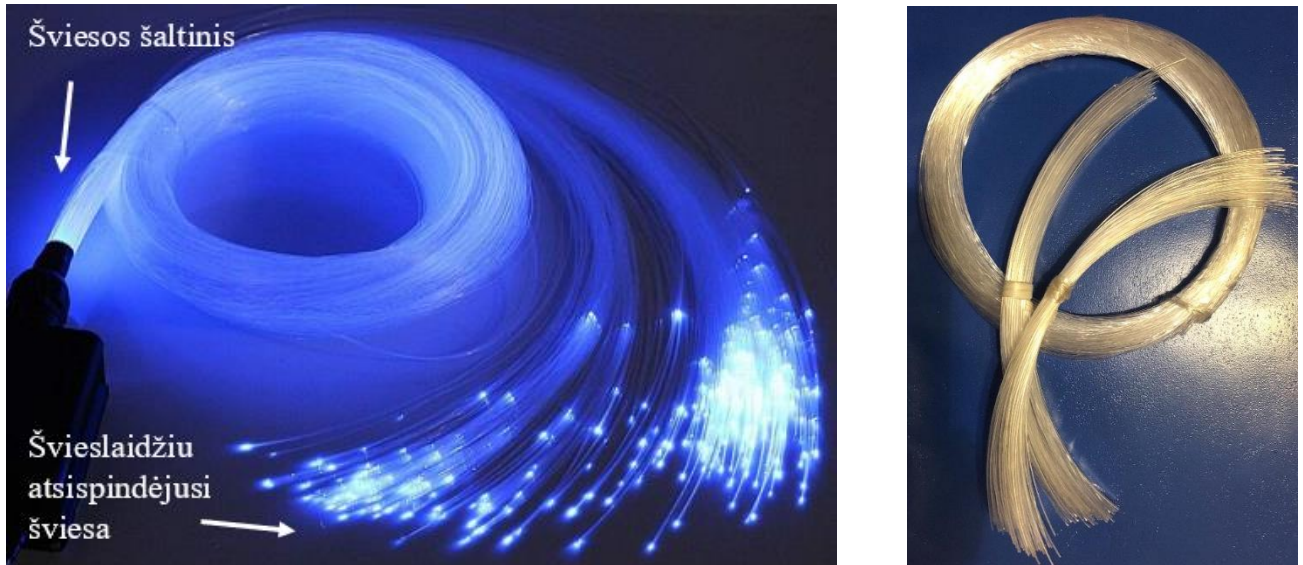


4.19 pav. (D) C735+SiO₂ (6,5%)+GP (2,75%) (cementas, SiO₂ mikrodulkės ir maltas stiklas), bandinys prieš ir po šaldymo.

Vertinant visų bandinių tankius dešimčių tikslumu reikšmės gautos vienodos 2,3 g/cm³, tačiau tiek bandinys (C), tiek bandinys (D), kurių sudėtyje malto stiklo atitinkamai buvo 30% ir 2,75% po 56 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų 3% NaCl tirpale vizualiai parodė geresnius rezultatus, negu bandiniai savo sudėtyje neturintys stiklo atliekos (A, B). Bandiniai su stiklo atlieka po 56 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklų neturėjo paviršinių pažeidimų.

4.8. Šviesai laidaus betono bandinio gamybos rezultatai

Panaudojus betono mišinio sudėtį kuri parodė geriausius mechaninius rodiklius $C735+SiO_2(6,5\%)+GP(2,75\%)$ buvo gaminamas šviesai laidaus betonas panaudojant optinio pluošto šviesai laidžius kabelius (4.18 pav.)



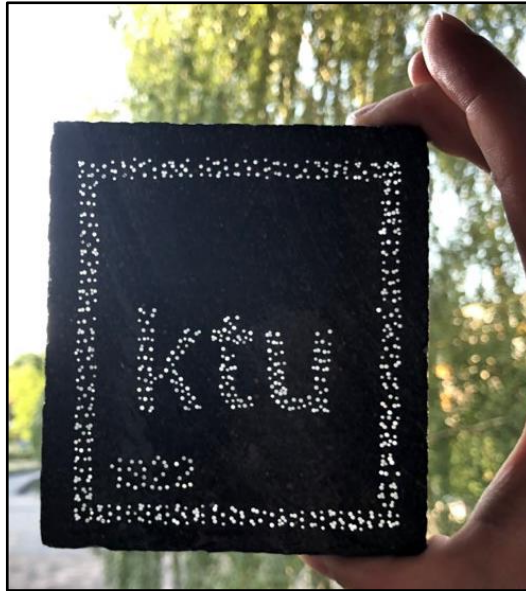
4.20 pav. Optinio pluošto šviesai laidūs kabeliai

Optinio pluošto kabeliai buvo įtempiami klojinyje naudojant plastikinį trafaretą kuriame tam tikru dėsningumu buvo išgręžiamos skylės per kurias buvo prakišami šviesai laidaus kabeliai (4.21 pav.), plastikinio trafareto pagalba buvo išgautas norimas šviesai laidaus kabelių išsidėstymas, bei palaikoma vertikali kabelių padėtis betono kietėjimo metu.



4.21 pav. Bandinio klojinys bei plastikinis trafaretas

Išformavus sukietėjusį bandinį kurio išmatavimai 100 x 120 x 200 mm diskinio pjūklo pagalba bandinys buvo supjaustytas statmenai šviesai laidžių kabelių išsidėstymo kryptčiai, gautas plytelės storis siekia apie 2 cm. Rezultatai parodė jog gautas bandinys puikiai praleidžia tiek dirbtinio šaltinio, tiek dienos šviesą (4.22 pav.)



4.22 pav. Šviesai laidaus betono bandinys

Kadangi betone integruoti šviesai laidūs kabeliai remiantis literatūros šaltiniais betono struktūra, mechaninis atsparumas susilpnėja, todėl tokiam gaminiui yra tinkamas ypač stiprus betonas, kurio pagalba kompensuojamas betono susilpnėjimas. Pasirinkto betono vandens ir cemento santykis siekia 0,25 jo sudėtis (C735+SiO₂ (6,5%)+GP (2,75%)), gniuždomojo bandymo metu šios sudėties betonas siekė 165,9 MPa gniuždomąjį stiprį todėl yra priskiriama ypač stipraus betono klasei.

Išvados

1. Baigiamojo darbo metu sukurta stiklo atliekos perdirbimo technologija, kuri susideda iš kelių etapų: stiklo atliekos surinkimo, valymo, pirminio smulkinimo (iki 1-5cm dydžio duženų) bei malimo iki reikiamo malto stiklo dalelių dydžio. Paruošimo metu gautas optimalus stiklo malimo laikas – 7 minutės.
2. Atlikus lenkimo ir gniuždymo bandymus buvo nustatytos mechaninės bandinių savybės. Su pramoniniu būdu malto stiklo atliekomis gauti rezultatai su terminiu apdirbimu (1+44+3 h) buvo didesni ir pasiekė (15,3 – 26,8 %) geresnius lenkiant bei (4,8 – 5,6 %) gniuždant lyginant su bandiniais, kurie buvo be terminio apdirbimo.
Rezultatai su stiklo taros atlieka buvo iki 30% prastesnės negu su pramoniniu būdu maltu langų stiklu. Apskaičiuotas bandinių tankis taip pat rodo panašius rezultatus, t.y. bandiniai, kurie parodė geresnius gniuždomojo bei lenkiamojo stiprio rezultatus buvo (2330 – 2400 kg/m³), o štai bandiniai kurie parodė prastesnius rezultatus buvo (2150 – 2360 kg/m³) tankio.
Atlikus bandymą su Na(OH) tirpalu, nustatyta jog tirpalas sureagavo su taros stiklo atliekomis ir reakcijos metu stiklas užpiltas Na(OH) tirpalu išskyrė oro burbuliukus. Remiantis Na(OH) tirpalo reakcija su malta stiklo tara manoma jog stiklo atlieka buvo užteršta ir tai galimai buvo bandinių porėtos struktūros, o taip pat ir gautų stiprių rezultatų priežastis.
3. Įvertinus stiklo atliekos įtaką cemento hidratacijos procesui nustatyta, kad hidratacijos proceso metu naudojant maltą stiklą rišimosi laikas trumpėja lyginant su mišiniu be stiklo atliekos. Mišinio kuriame panaudota 30 % malto stiklo rišimosi laikas sutrumpėjo 7,9 valandos, o sudėtyje kurioje malto stiklo 2,75 % ir silicio mikro dulkių 6,5 %, rišimosi trukmė sutrumpėjo atitinkamai 6,85 valandos.
4. Atlikus betono atsparumo šalčiui (paviršiniu šaldymu) bandymą, nustatyta jog po 56 paviršinio šaldymo ir atšildymo ciklą 3% NaCl tirpale bandiniai, kurie turėjo savo sudėtyje stiklo atliekos atitinkamai 30% ir 2,75% neparodė jokių vizualių paviršiaus struktūros pokyčių lyginant su bandiniais kuriuose nebuvo stiklo atliekos. Didžiausias paviršiaus struktūros pokytis matomas pirmajame (a) bandinyje kurio sudėtyje nebuvo nei malto stiklo, nei silicio mikrodulkių.

Literatūros sąrašas

1. ISLAM, GM Sadiqul; RAHMAN, M. H.; KAZI, Nayem. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2017, 6.1: 37-44.
2. NAIK, Tarun R. Sustainability of concrete construction. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2008, 13.2: 98-103.
3. IMBABI, Mohammed S.; CARRIGAN, Collette; MCKENNA, Sean. Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2012, 1.2: 194-216
4. LU, Jian-Xin, et al. Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. *Materials & Design*, 2017, 135: 102-111..
5. PAUL, Suvash Chandra; ŠAVIJA, Branko; BABAFEMI, Adewumi John. A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. *Journal of cleaner production*, 2018, 198: 891-906.
6. DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 75: 22-29.
7. DYER, Thomas D. Glass recycling. In: *Handbook of Recycling*. Elsevier, 2014. p. 191-209.
8. DISFANI, M. M., et al. Recycled crushed glass in road work applications. *Waste Management*, 2011, 31.11: 2341-2351.
9. ZARAUSKAS, Laurynas; SKRIPKIŪNAS, Gintautas; GIRSKAS, Giedrius. Influence of aggregate granulometry on air content in concrete mixture and freezing-thawing resistance of concrete. *Procedia Engineering*, 2017, 172: 1278-1285.
10. KIM, Jihwan, et al. Durability properties of a concrete with waste glass sludge exposed to freeze-and-thaw condition and de-icing salt. *Construction and building materials*, 2014, 66: 398-402.
11. ŠERELIS, Evaldas; VAITKEVIČIUS, Vitoldas; KERŠEVIČIUS, Vidas. Mechanical Properties and Microstructural Investigation of Ultra-High Performance Glass Powder Concrete. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2016, 14.1: 5-11.
12. LETELIER, Viviana, et al. Mechanical properties of concrete with recycled aggregates and waste glass. *Structural Concrete*, 2017, 18.1: 40-53.
13. ZHANG, Tongsheng, et al. Study on optimization of hydration process of blended cement. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2011, 107.2: 489-498.
14. SKRIPKIUNAS, G. Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės. *Kaunas: Vitae Litera*, 2007, 105-115.
15. KUBILIŪTĖ, Raimonda. *Pucolaninio priedo iš molio ir AlF₃ gamybos atliekos sintezė bei įtaka portlandcemenčio savybėms*. 2015. PhD Thesis. Kaunas University of Technology.
16. JANG, Hongseok, et al. Properties of different particle size of recycled TFT-LCD waste glass powder as a cement concrete binder. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2015, 16.12: 2591-2597.

17. GRINYS, Audrius; BOCULLO, Vytautas; GUMULIAUSKAS, Algirdas. Research of Alkali Silica Reaction in Concrete With Active Mineral Additives. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2014, 6.1: 34-41.
18. RAYMUNT, Alexandra Cooper; CLANCY, Paulette. Structural characterization of amorphous materials applied to low-k organosilicate materials. *Thin Solid Films*, 2014, 562: 411-422.
19. ROWE, Michael C.; BREWER, Brendon J. AMORPH: A statistical program for characterizing amorphous materials by X-ray diffraction. *Computers & geosciences*, 2018, 120: 21-31.
20. Balandis A., Kaminskas R., Vaickelionis G. (2012). *Mokomoji knyga. Statybinių medžiagų chemija. I dalis Silikatų ir stiklo chemija*. Kaunas: Technologija.
21. AL-JABRI, Khalifa S.; AL-SAYDY, Abdullah H.; TAHA, Ramzi. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials*, 2011, 25.2: 933-938.
22. KUPRIENĖ, Jūratė; STRIOGIENĖ, Aurelija; REMEIKAITĖ, Solveiga. Mokslo ir meno publikacijų metaduomenų rengimo eLABa sistemoje metodinė priemonė. 2019.
23. LIEW, K. M.; SOJOBI, A. O.; ZHANG, L. W. Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and building materials*, 2017, 156: 1063-1095.
24. GOLEWSKI, Grzegorz Ludwik. Green concrete composite incorporating fly ash with high strength and fracture toughness. *Journal of cleaner production*, 2018, 172: 218-226.
25. ŠERELIS, Evaldas. *Ypač stipraus betono struktūros savybių ir technologijos tyrimai*. 2016. PhD Thesis. Kaunas University of Technology.
26. ISLAM, GM Sadiqul; RAHMAN, M. H.; KAZI, Nayem. Waste glass powder as partial replacement of cement for. 2016.
27. KANDASAMI, Ramesh K.; MURTHY, Tejas Gorur. Effect of particle shape on the mechanical response of a granular ensemble. *Geomechanics from micro to macro*, 2014, 1093-1098.
28. LE, Ha Thanh; SIEWERT, Karsten; LUDWIG, Horst-Michael. Alkali silica reaction in mortar formulated from self-compacting high performance concrete containing rice husk ash. *Construction and building materials*, 2015, 88: 10-19.
29. SHULDYAKOV, Kirill, et al. Superplasticizer effect on cement paste structure and concrete freeze-thaw resistance. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing, 2016. p. 070011.
30. SKRIPKIŪNAS, Gintautas, et al. Microstructure changes in hardened cement paste after freezing–thawing cycles. *Materials Science*, 2013, 19.1: 108-114.
31. LI, Yue, et al. Experimental study of light transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and building materials*, 2015, 96: 319-325.
32. HENRIQUES, Thiago dos S.; DAL MOLIN, Denise C.; MASUERO, Ângela B. Study of the influence of sorted polymeric optical fibers (POFs) in samples of a light-transmitting cement-based material (LTCM). *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 305-315.
33. BASHBASH, Basma F., et al. Basics of light transmitting concrete. *Basics of light transmitting concrete*, 2013, 2.3.
34. SAWANT, A. B.; JUGDAR, R. V.; SAWANT, S. G. Light transmitting concrete by using optical fiber. *Int. J. Inventive Eng. Sci*, 2014, 3.1: 23-28.

35. BUREAU, M. B. Light transmitting concrete panels-a new innovation in concrete technology. *The Masterbuilder*, 2013, 98-102.
36. RUTKAUSKAS, Aurimas. *Mineralinių priedų poveikis betono atsparumui šarminiai korozijai*. 2018. PhD Thesis.
36. LST EN 12617-4:2003. *Betoninių konstrukcijų apsauginiai ir remontiniai produktai bei sistemos. Bandymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo ir išsiplėtimo nustatymas.*
37. LST EN 1367-4:2008. *Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo džiūstant nustatymas.*
38. LST EN 12808-4:2009/AC:2011. *Plytelių glaistai. 4 dalis. Susitraukimo nustatymas.*
39. LST EN 12390-5:2019. *Sukietėjusio betono bandymai. 5 dalis. Bandinių lenkimo stipris.*
40. LST EN 12390-4:2000. *Betono bandymas. 4 dalis. Stipris gniuždant. Bandymo mašinų techniniai reikalavimai*
41. LST EN 12390-1:2012. *Sukietėjusio betono bandymai. 1 dalis. Pavidalas, matmenys ir kiti bandinių bei liejimo formų reikalavimai.*
42. LST EN 196-9:2010. *Cemento bandymų metodai. 9 dalis. Hidratacijos šiluma.*
43. LST EN 196-6:2019. *Cemento bandymų metodai. 6 dalis. Smulkumo nustatymas.*
44. LST 1428-19:2016. *Betonas. Bandymo metodai. 19 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas vienpusiu šaldymu ir atšildymu.*
45. LST EN 1367-4:2008. *Užpildų šiluminių savybių ir atsparumo atmosferos poveikiams nustatymo metodai. 4 dalis. Susitraukimo džiūstant nustatymas.*